

ปริมาณวิเคราะห์องค์ประกอบทางธรณีฐานที่ลงผล
ต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกในลุ่มน้ำชี

ปริญญานิพนธ์

ของ

ประสิทธิ์ คุณรัตน์

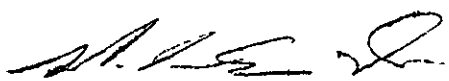
สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดุสิต ๑๖ พระโขนง กรุงเทพฯ ๑๐ _____ โทร ๐๑๔๑๖๗๕, ๐๑๔๑๐๕๐

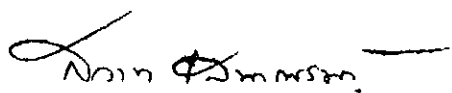
เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

เมษายน ๒๕๒๐

65284

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิติได้พิจารณาปฏิญานี้พนธ์ฉบับนี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิตของ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้.

 ประธาน

 กรรมการ

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์และ
สงเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ
วิทยารัฐ และ ศาสตราจารย์สวาท เสนาณรงค์ เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา
แนะแนวและแนะนำ ให้ข้อคิดเห็น รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนปริญญานิพนธ์
เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับ

คุณอนุสรณ์ “สกุลสุข” ที่ให้ความรู้ ความกระจ่างและช่วยเหลือเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดี
ในทางสถิติ ตลอดจนแนะนำทิศทางให้ปริญญานิพนธ์สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้น

คุณนาริน อุทัยวรรณ เจ้าหน้าที่โปรแกรม สำนักงานสถิติแห่งชาติ และ
คุณมัธยม รัชตเมธี เจ้าหน้าที่ฝ่ายบริการ บริษัทไอบีเอ็ม ที่กรุณาช่วยเหลือทางด้าน
คอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งขอขอบคุณ พี่ เพื่อน น้อง ๆ ที่ต้องลำบากด้วย

ท้ายที่สุด ขอกราบคารวะและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงที่สุดต่อ คุณพ่อ คุณแม่
พี่ น้อง และญาติ ที่สู้ตรากตรำลำบากทนทุกข์ยาก เพื่อดูคหฺนุนและเสริมสร้างการศึกษา
ของผู้วิจัยตลอดมา

ประสิทธิ์ คุณรัตน์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1	บทนำ
	ภูมิหลัง
	ความมุ่งหมายของการศึกษา
	สมมุติฐานของการศึกษา
	ความสำคัญของการศึกษา
	ขอบเขตของการศึกษา
	ข้อตกลงเบื้องต้น
	เกณฑ์ในการเลือกบริเวณที่ศึกษา
	อธิบายศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการศึกษา
2	ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3	วิธีดำเนินการ
	แหล่งข้อมูลและเครื่องมือ
	การเก็บรวบรวมข้อมูล
	การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล
	สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล
4	โครงสร้างทางธรณีวิทยาและธรณีฐานานบริเวณลุ่มน้ำชี
	ลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาบริเวณลุ่มน้ำชี
	ลักษณะและชนิดของดินในลุ่มน้ำชี
	ลักษณะภูมิอากาศบริเวณลุ่มน้ำชี
	ลักษณะโครงสร้างของแม่น้ำชี

5	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	60
	การวิเคราะห์วัฏจักร การสีกรรณของพัฒนา การลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแอก	60
	การวิเคราะห์ทิศทางธรณีฐานที่เป็นองค์ประกอบรวมของการเกิดทะเลสาบรูปแอก	63
	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางธรณีฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก	73
	การสร้างสมการพยากรณ์ ลักษณะทางธรณีฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแอก	80
6	สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	82
	สรุปผลการศึกษาค้นคว้า	82
	อภิปรายผลการศึกษาค้นคว้า	83
	วัฏจักรแห่งการสีกรรณของการพัฒนา ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแอก	84
	ทิศทางธรณีฐานที่เป็นองค์ประกอบรวมของการเกิดทะเลสาบรูปแอก	90
	องค์ประกอบทางธรณีฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก	92
	สมการพยากรณ์ลักษณะทางธรณีฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแอก	97
	ข้อบกพร่องในการศึกษา	98
	ข้อเสนอแนะในการศึกษาต่อไป	98
	บทบรรณานุกรม	100
	ภาคผนวก	

บัญชีตาราง กราฟ

ตาราง	หน้า
1 แสดงปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิของอากาศประจำวัน	52
2 แสดงสถานะทางอุทกวิทยาของแม่น้ำชี	57
3 แสดงปริมาณน้ำท่าของแม่น้ำชีและลำน้ำสาขา ณ สถานีต่าง ๆ	58
4 แสดงอัตราส่วนของพื้นที่และอัตราส่วนของความสูงในภูมิประเทศลุ่มน้ำชี	61
5 แสดงค่า integrate ที่คำนวณได้แต่ละช่วงภายใต้เส้นโค้ง	62
6 แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายใน ระหว่างมิติทางธรณีฐานของทะเลสาบรูปแอก	66
7 แสดงค่าน้ำหนักองค์ประกอบของมิติทางธรณีฐานแต่ละมิติที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบก่อนหมุนแกน	74
8 แสดงค่าน้ำหนักองค์ประกอบของมิติทางธรณีฐานแต่ละตัวภายใต้การหมุนแกน	77
 กราฟ	
1 แสดงค่า hysometric curve ของพื้นที่ลุ่มกักกักกอร์อนระล่าง	17
2 แสดงปริมาณดินที่สูญเสียและปริมาณฝนไหลตามผิวพื้นที่ปกคลุมด้วยพืชต่างชนิดกัน	21
3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่กับาความสูง	64

บัญชีภาพ แผนที่

ภาพที่		หน้า
1	แสดงพัฒนาการ ลำน้ำแบบคกเกี่ยวเป็นทะเลสาบรูปแอก	3
2	แสดงการไหลสายของกระแสน้ำและการ ขยายเคลื่อนย้ายคุ้งน้ำ	5
3	แสดงโครง สร้างของลำน้ำ	13
4	แสดงโครง สร้างของคุ้งน้ำ	13
5	แสดงลำน้ำแบบคกเกี่ยวไหลตัดคั่นล้นลอคอดคุ้งน้ำ	23
6	แสดงการ เกิดสันคันดินและร่องคันดินกับการ เคลื่อนย้าย ร่องน้ำ	25
7	แสดงลำน้ำพัฒนาการ ขยายร่วฝิ่สันคันดินและความโค้งร่องคันดิน	25
8	แสดงการ ทดลองพัฒนาการกึ่งน้ำ ของแม่น้ำจำลอง	27
9	แสดงการ ขยายแอ่งลึกร่องน้ำ และสันทรายทองธาร กับพัฒนาการ ความคดเกี่ยวของลำน้ำ	36
10	แสดงโครง สร้างทางธรณีวิทยาของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	45
11	แสดงภาพตัดขวางโครง สร้างทางธรณีวิทยาของ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	46
12	แสดงภาพตัดขวางภูมิประเทศและชุดดินลุ่มน้ำชี	49
13	แสดงตำแหน่งมิติตั้ง 12 มิตี ขององค์ประกอบ I กับ II, III, IV, V	70
14	แสดงตำแหน่งมิติตั้ง 12 มิตี ขององค์ประกอบ II กับ III, IV, V และองค์ประกอบ III กับ IV	71
15	แสดงตำแหน่งมิติตั้ง 12 มิตี ขององค์ประกอบ V กับ III, IV	72
 แผนที่		
1	แสดงระบบลำน้ำและ ลักษณะภูมิประเทศลุ่มน้ำชี	53
2	แสดงบริเวณที่กักน้ำและที่ทิ้งของทะเลสาบ	59

บทที่ ๑

บทนำ

ภูมิหลัง

ลักษณะพื้นผิวพิภพจะวิวัฒนาการ ภายใต้การกระทำของขบวนการชะล้าง
บุพพังทะลายและขบวนการเสริมสร้าง การสึกกร่อนเริ่มขบวนการเมื่อหิมะละลายและ
หยาดฝนตกกระทบพื้นทวีปที่ไม่มีอะไรปกคลุม น้ำที่เหลือจากความสามารถของดินจะ
ถูกซึมได้ (infiltration capacity) จึงเป็นน้ำไหลบ่าผิวพื้น (surface
runoff) ไปตามความลาดของภูมิประเทศ เกิดขบวนการชะล้างเป็นแผ่น (sheet
erosion) ในที่สุดขยายเป็นร่องธารหรือทางน้ำ ลำน้ำจึงเป็นตัวการสำคัญที่มี
อิทธิพลต่อการพัฒนาลักษณะภูมิประเทศ ซึ่ง ธอร์นเบอร์รี่ (Thornbury) ให้ความสำคัญ
เห็นเกี่ยวกับปัจจัยของการพัฒนาลักษณะภูมิประเทศว่า โครงสร้างทางธรณีวิทยา
(geologic structure) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ควบคุมวิวัฒนาการลักษณะภูมิประเทศ
โครงสร้างของหิน (rock structure) จะเกิดก่อนสภาพลักษณะภูมิประเทศที่เห็น
อยู่ในปัจจุบัน นั่นคือ โครงสร้างทางธรณีวิทยามีผลต่อโครงร่างของหิน ซึ่งเป็นปัจจัย
สำคัญต่อรูปลักษณะภูมิประเทศ ฮัตตัน (Hutton) ให้เห็นผลสอดคล้องกันว่า ลักษณะ
ภูมิประเทศในปัจจุบันเป็นกุญแจไปสู่อดีต ปัจจัยที่ทำให้ภูมิประเทศเปลี่ยนแปลง เป็น
ปัจจุบันคือขบวนการทางธรณี (geologic process) คงไม่มีใครปฏิเสธว่า ลำน้ำ
ไม่ได้กัดเซาะหาลายหุบเขาและลุ่มน้ำ (Thornbury, 1972 : 128 - 134)
เดวิส (Davis) ให้ความสำคัญเห็นว่าการพัฒนาลักษณะพื้นพิภพคือ
โครงสร้างทางธรณี (structure) กระบวนการกระทำ (processes) และเวลา
(stage) เกี่ยวกับการกำเนิดและวิวัฒนาการปรับตัวของลำน้ำ มีนักธรณีวิทยา
ให้ความสนใจศึกษาและแสดงความคิดเห็นอย่างกว้างขวางเป็นต้นว่า

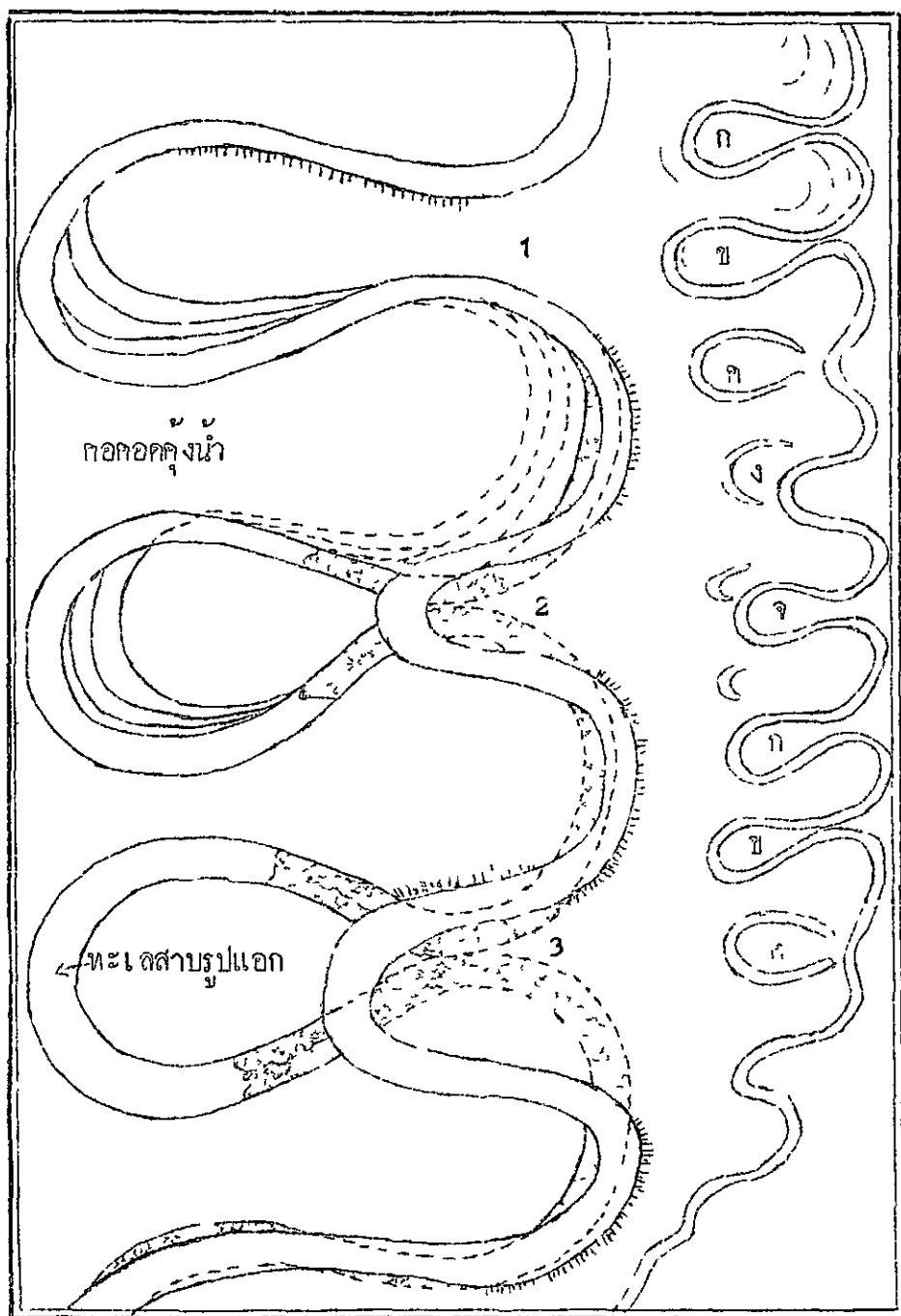
สมอล (Small) ให้เหตุผลว่า แรกกำเนิดและพัฒนาการตามลำดับของ วัฏจักรลำน้ำ จะถูกกำหนดด้วยปัจจัยสำคัญ 2 ประการคือ

1. ลักษณะธรรมชาติของการกำเนิดพื้นผิวตอนแรก (initial surface) ที่ลำน้ำไหลผ่าน

2. โครงสร้างทางธรณี (geologic structure) (Small, 1972 : 225 - 242) ลองเวล (Longwell) ได้สรุปวิวัฒนาการของลำน้ำว่า ลำน้ำจะปรับร่องน้ำจากที่หนึ่งไปสู่อีกที่หนึ่ง หรือจากสภาวะหนึ่งไปเป็นอีกสภาวะหนึ่ง ตามกาลเวลา นั่นคือ ความลาดชันของน้ำ (gradient) ขนาดและรูปลักษณะร่องน้ำ (dimensions) จะปรับตัวต่อเนื่องตามการผันแปรปริมาณน้ำไหลออก (discharge) การเพิ่มความเร็วและปริมาณน้ำจะเพิ่มตะกอนขนย้ายขึ้นบริเวณครูก้นน้ำ ทั้งขบวนการพังทลายและการทับถมทำให้ลำน้ำปรับระดับอยู่ตลอดเวลา และยังปรับการขนย้าย พักพาตะกอน จนกระทั่งร่องน้ำถึงระดับฐานการพังทลาย (Base level) ซึ่งมีผลต่อการแปรเปลี่ยนลักษณะภูมิประเทศโดยตรง (Longwell, 1956 : 72 - 97) กิลลูลี (Gilluly) ให้เหตุผลว่า การปรับความลาดชันของลำน้ำเกิดขึ้นได้สองทาง คือ

1. การกัดกร่อนและการทับถมของน้ำ (erosion and deposition)

2. การเพิ่มความยาวด้วยการคดโค้ง (Sinuosity) เพราะ ลำน้ำแบบคดโค้ง (Meander stream) บางช่วงระดับเกือบถึงฐานการพังทลายหรือระดับน้ำทะเล (Base level) ไม่สามารถกัดเซาะคั่นลึก เพื่อลดระดับได้ ขบวนการที่จะลดระดับให้ต่ำลงต้องอาศัยการเพิ่มความคดเคี้ยว (Gilluly, 1968 : 207) จากสภาพแท้จริงจะเห็นว่า ไม่มีลำน้ำใดไหลเป็นแนวตรง ๆ เกินกว่าสิบเท่า ของความกว้างร่องน้ำ ส่วนใหญ่จะคดโค้งราบเรียบคล้ายวงบ่วง (Loops) ที่มีขนาดเกือบเท่า ๆ กัน (Flint, 1974 : 130) ทากอนี (Targioni) ชี้ให้เห็นถึงสาเหตุที่ทำให้คูก้นน้ำคดเคี้ยวในตอนปลายมีชัฏม้วย (Late maturity) เนื่องจากลำน้ำ

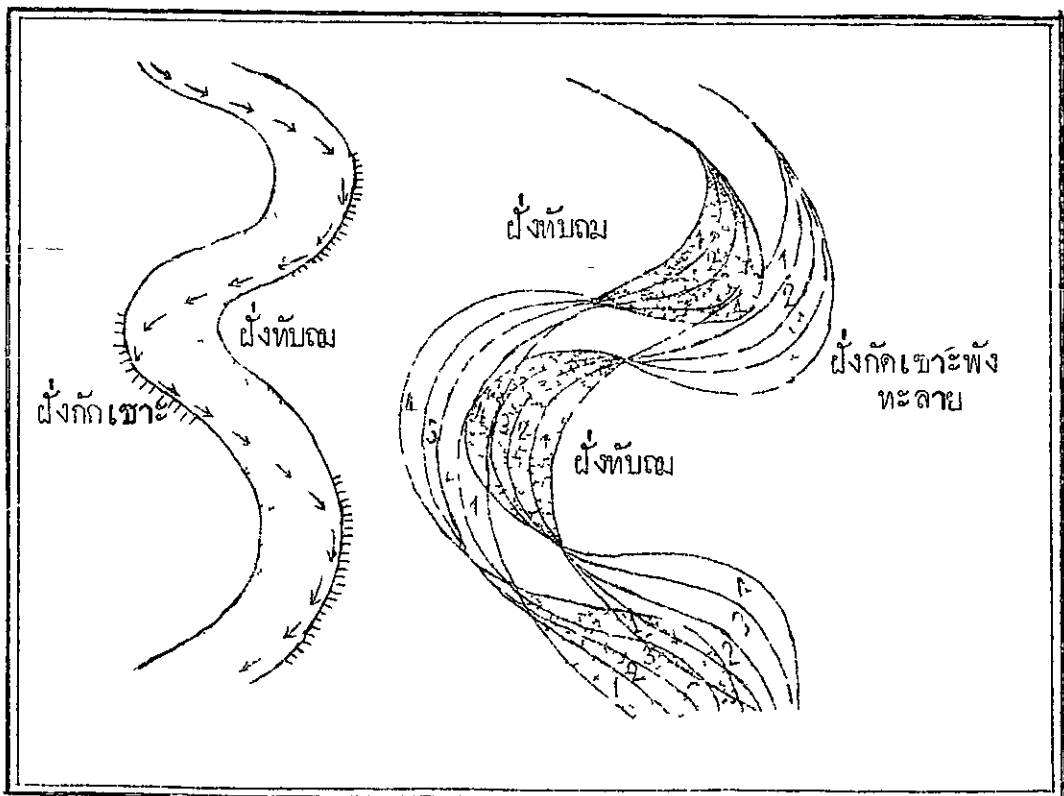


ภาพที่ 1 แสดงพัฒนาการลำน้ำแบบคดเคี้ยวเป็นทะเลสาบรูปแอก

ไหลผ่านบริเวณดินตะกอนทับถมที่มีความต้านทาน (resistant) แข็งไม่เท่ากัน ประกอบกับความแตกต่างของโครงสร้างหินพื้นฐานบังคับทิศทางกรไหลของสายน้ำ (Thornbury, 1969 : 130) ในทำนองเดียวกัน ซอว์กิน (Sawkin) อธิบายว่า ลักษณะความลาดชันที่แม่น้ำไหลผ่าน การเปลี่ยนแปลงตะกอนพัดพาและ หินพื้นฐานรวมทั้งแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal forces) เป็นสาเหตุให้ ลำน้ำคดเคี้ยว (Sawkin, 1974 : 183) เกี่ยวกับพัฒนาการของลำน้ำแบบ คดโค้ง จนร่องน้ำเป็นทะเลสาบรูปแอกนั้น มีผู้ศึกษาและให้เหตุผลหลายคน เช่น

ฟลินท์ (Flint) กล่าวว่า การเกิดคูกน้ำ จนกระทั่งเป็นทะเลสาบ รูปแอก ไม่ได้อุบัติขึ้นโดยบังเอิญ (accident) แต่จะพัฒนาอย่างมีระบบ ปรากฏให้เห็นได้ตามร่องน้ำที่มีความลาดชันน้อย (gentles gradient) ใน บริเวณที่ราบน้ำท่วมโดยทั่วไป (Flint, 1974 : 133) ธอร์นเบอร์รี่ (Thornbury) ได้อธิบายการเกิดทะเลสาบรูปแอกว่า เกิดในตอนปลาย วัฏจักรการทำลาย (Fluvial Cycle) ซึ่งลักษณะคูกน้ำถูกกระทำโดยการกัดเซาะ ด้านข้าง (lateral erosion) ของสายน้ำฝั่งคานชัน (spur) ทำให้คูกน้ำขยาย กว้างออกจนเกือบแบนราบ ในขณะที่กระแสน้ำไหลปะทะริมฝั่งคานชันของคูกน้ำ ตอนบน (upstream) และคานชันคูกน้ำตอนล่าง (downstream) รอบหัวโค้ง คูกน้ำ ทำให้ลดความกว้างพื้นที่ระหว่างคานชันของคูกน้ำ (Meander spur) แคบลงเป็นคอคอกคูกน้ำ (Meander neck) เมื่อการกัดเซาะด้านข้าง ทั้งสองของคอคอกคูกน้ำดำเนินต่อไป ลำน้ำจะไหลตัดทะลุคอคอกคูกน้ำ (Meander cutoff) ซากของคูกน้ำเก่าส่วนนี้จะค่อย ๆ ห่างจากแกนกลางร่องน้ำปัจจุบัน การทับถมของตะกอนพัดพาและถูกปล่อยทิ้งกลายเป็นร่องน้ำรูปแอกวู้ (Oxbow) (รูป 1) ซึ่งเป็นลักษณะลำน้ำขั้นพัฒนาเต็มที่ (Full Mature Stage) ดังนั้นการ พังทะลายคานข้างตามแนวขอบเขตคูกน้ำ (Meander belt) ทำให้คูกน้ำกว้างออก

ลำน้ำมีอิสระเพิ่มความคดโค้งจนคูก้นน้ำบรรจบตักกัน แต่จะแตกต่างจากคูก้นน้ำคัททะอู (Meander Cutoff) ในช่วงลำน้ำขอนคั่น (Incise stream) ตรงที่ไม่มีหิน พื้นฐานโผล่ให้เห็น ทั้งนี้เพราะผิวพื้นเป็นที่ราบน้ำท่วมถึงปกคลุมด้วยดินตะกอนน้ำพา (Thornbury, 1969 : 132) ลีท (Leet) ได้แสดงความเห็นว่า การไหลส่าย หรือไหลเหวี่ยง (swing) ของกระแสน้ำจากคานหนึ่งไปสู่อีกคานหนึ่ง เป็นสาเหตุ ให้คูก้นน้ำโค้งติดต่อกัน โดยการพังทะลายตามริมฝั่งโค้งก้านนอกหรือคานโค้งเว้า ที่มีอัตราการไหลวนเวียนของกระแสน้ำ (turbulent) สูงสุดและการทับถมตาม ฝั่งโค้งก้านใน ซึ่งกระแสน้ำไหลวนเวียนลดต่ำลง ขนาดคูก้นน้ำขึ้นอยู่กับขนาด ลำน้ำและความเต็มโตของคูก้นน้ำจะสิ้นสุดเมื่อถึงขนาดตามเกณฑ์ (critical size) รูป 2 (Leet, 1965 : 135 - 155) ลองเวล (Longwell) ได้ศึกษา



ภาพที่ 2 แสดงการไหลส่ายของกระแสน้ำและการขยายเคลื่อนย้ายคูก้นน้ำ

และประมวลสรุปเกี่ยวกับการพัฒนาลำน้ำแบบคคโค้งจนเป็นทะเลสาบรูปแอก ดังนี้

1. การศึกษาวิจัยลำน้ำ ส่วนมากจะศึกษาเกี่ยวกับมีร่องน้ำกับโครงร่างลำน้ำ
2. ลักษณะชายฝั่งลำน้ำโดยทั่วไปประกอบด้วยวัตถุที่ง่ายต่อการกัดเซาะพังทลาย
3. การทับถมของตะกอนน้ำพาจะขยายตามชายฝั่งโค้งจนจนเกิดสันทรายลำน้ำ (Point - bar)
4. ความเร็วของกระแสน้ำและการไหลวนเวียนสูงสุดจะอยู่ตามแนวฝั่งโค้งด้านนอก ซึ่งเป็นแนวร่องน้ำลึกและฝั่งชันที่สุดของลำน้ำ
5. ลักษณะร่องน้ำที่เกิดลำน้ำคคเคียวจนเป็นทะเลสาบรูปแอกจะกว้างมาก แนวเส้นศูนย์กลางพื้นที่ลุ่มน้ำกว้างกว่าเส้นศูนย์กลางความโค้งร่องน้ำ นั่นคือ พัฒนาการลำน้ำอยู่ที่การกัดเซาะฝั่งบริเวณเดียวกันซ้ำ ๆ กัน ซึ่งจะสัมพันธ์กับความลึกของร่องน้ำ การไหลวนเวียนประกอบกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) และการส่ายตัวเหวี่ยงตัวของกระแสน้ำจะเพิ่ม การพังทลายตามฝั่งปะทะเร็วยิ่งขึ้น (Longwell, 1956 - 130)

✓ ตามที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า ปัจจัยที่ควบคุมพัฒนาการลักษณะภูมิประเทศที่สำคัญคือ โครงสร้างทางธรณีวิทยา (geologic structure) ขบวนการลดระดับและปรับระดับ (denudation processes) และเวลา (stage) โดยเฉพาะตามทฤษฎีกระษัยจักรทางธรณีสัณฐานของเควิส เชื่อว่าความแตกต่างของลักษณะภูมิประเทศ เนื่องมาจากขั้นตอนการพัฒนา (stage) อันเป็นแนวคิดแบบอุดมคติที่เควิสเน้นตระหนักและเป็นหลักพื้นฐานสำคัญ ในการศึกษาลักษณะภูมิประเทศตามลำดับพัฒนาการ โดยแบ่งเป็นขั้นพัฒนาตอนต้นหรือขั้นปฐมวัย (Youth stage) ขั้นพัฒนาเต็มที่หรือมัชฌิมวัย (Mature stage) และ

ขั้นตอนปลายแห่งการพัฒนาหรือปัจฉิมวัย (Old stage) ด้วยการพิจารณา
ปรากฏการณ์ (evidences) ของลักษณะภูมิประเทศเป็นเกณฑ์ การศึกษา
วัฏจักรทางธรณีสัณฐาน (Geomorphie Cycle) ตามลำดับเวลา
(sequent of time) เป็นขั้นตอนนั้น มีนักภูมิศาสตร์จำนวนไม่น้อยให้ความ
เห็นว่าเป็นไปในลักษณะสัมพัทธ์ (relative) มากกว่าลักษณะสัมบูรณ์ (absolute
sense) จึงไม่เห็นด้วยและคัดค้านขั้นตอนพัฒนาภูมิประเทศตามแนวคิดทฤษฎี
เควิส และถึงแม้จะทราบปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้ลำน้ำกัดเคี้ยวจนตักทะเล
สาบรูปแอก รวมทั้งพิสูจน์ให้เห็นว่าลำน้ำและทะเลสาบรูปแอก ไม่ได้เกิดแบบลุ่ม
แต่ก็ไม่สามารถที่จะอธิบายได้อย่างแน่ชัดนักว่า ทำไมลำน้ำจึงพัฒนาร่องน้ำให้
คดโค้งเป็นคูลำน้ำรูปแอก การอธิบายอย่างง่าย ๆ ซึ่งเป็นเพียงข้อสันนิษฐาน
เบื้องต้นว่าเนื่องมาจากรูปลักษณะภูมิประเทศ (configuration) ผิดปกติ
ตั้งแต่แรกกำเนิดและปัจจัยอื่น ๆ นั้นยังหาข้อยุติที่กระจ่างชัดไม่ได้

จากเหตุผลและปัญหาดังกล่าว ทำให้เราสนใจที่จะศึกษาลักษณะทาง
ธรณีสัณฐานการเกิดทะเลสาบรูปแอก และขั้นตอนการพัฒนาภูมิประเทศของ
ลำน้ำชื่อนกกลาง ซึ่งเป็นลำน้ำแบบคดเคี้ยวไหลคดวนที่ราบน้ำท่วมถึง ที่เกิดจาก
การชะล้างสีกรรอนทั้งละลายดระดับลง โดยเฉพาะเป็นลำน้ำที่มีทะเลสาบ
รูปแอกมากที่สุดในประเทศ

ความมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อตรวจสอบทฤษฎีวัฏจักรการสึกกร่อนทางธรณีสัณฐานของเควิส
ที่ว่าทะเลสาบรูปแอก เกิดขึ้นในตอนปลายของวัฏจักรการสึกกร่อนทั้งทะเล
(Cycle of Erosion) นั้น เป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดทะเลสาบรูปแอกกับองค์ประกอบทางธรณีสัณฐานในกลุ่มน้ำชีตอนกลาง
3. เพื่อสร้างสมการพยากรณ์ ลักษณะทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก

สมมุติฐานของการศึกษา

1. ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแอก อยู่ในขั้นตอนปลายหรือปัจฉิมวัย (Old Age stage) ของกระบวนจักรการพัฒนาลักษณะภูมิประเทศตามทฤษฎีของเควิส
2. การเกิดทะเลสาบรูปแอกของแม่น้ำชี เป็นผลมาจากมิติทางธรณีสัณฐานต่าง ๆ ดังนี้ ความคดเคี้ยวของลำน้ำ มุมร่องน้ำโค้ง ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอก ขอบเขตคูกน้ำ รัศมีความโค้ง ความลาดชันด้านข้าง ลักษณะดิน ระบายของทะเลสาบรูปแอก ความกว้างลุ่มน้ำ ช่วงยาวคูกน้ำ ช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก และระยะห่างทะเลสาบรูปแอก
3. องค์ประกอบทางธรณีสัณฐาน ที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกของกลุ่มน้ำชี น่าจะมีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ

ความสำคัญของการศึกษา

1. เป็นการพิสูจน์และสามารถให้ข้อยุติได้อย่างหนึ่งว่า ทฤษฎีกระบวนจักรการสึกกร่อนทางธรณีสัณฐานของเควิสเป็นจริงหรือไม่
2. ทำให้ทราบลักษณะภูมิประเทศของกลุ่มน้ำชีในบริเวณที่ศึกษาอยู่ในขั้นตอน (stage) ใดของการพัฒนาลักษณะภูมิประเทศ

3. ทำให้ทราบลักษณะของภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแอก ว่ามีลักษณะทางธรณีสัณฐานอะไรบ้างที่เป็นองค์ประกอบรวม

4. ทำให้ทราบคุณลักษณะพิเศษขององค์ประกอบทางธรณีสัณฐาน ที่ปรากฏรวมอยู่ในลักษณะและธรรมชาติของทะเลสาบรูปแอก ในลุ่มน้ำชี

5. การวิจัยครั้งนี้ จะเป็นแหล่งข้อมูลอย่างหนึ่ง ที่จะนำไปเป็นประโยชน์ในการพัฒนาแหล่งน้ำและการชลประทาน

ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาเฉพาะทะเลสาบรูปแอก ในลุ่มน้ำชีตอนกลางระหว่างลำน้ำพองกับลำน้ำป่าไผ่มาบรรจบกับแม่น้ำชีคือ ตั้งแต่บ้านเลิงบัวน้อย อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม จนถึง บ้านคุยค้อ อำเภอเมืองร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด

2. องค์ประกอบที่มีผลต่อทะเลสาบรูปแอก ได้เลือกตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เพียง 12 ตัวแปร ได้แก่ ความลาดชันด้านข้างของลุ่มน้ำ (Valley side slope) ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอก (Oxbow - lake slope) ความคดเคี้ยวลำน้ำ (Sinousity) มุมร่อนน้ำโค้ง (Channel arc angle) รัศมีความโค้ง (Radius of curvature) คุณสมบัติของดิน (Soil properties) ขอบเขตคูกน้ำ (Meander belt) ความกว้างลุ่มน้ำ (Valley width) ขวงยาวคูกน้ำ (Meander length) ระยะห่างของทะเลสาบ (Oxbow - lake distance) และช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก (Oxbow - lake interval)

ข้อตกลงเบื้องต้น

บทนำ

1. ยอมรับทฤษฎีการสักรการสักรทางธรณีสัฐาน (Geomorphic Cycle) ของเควิส ที่เชื่อว่าการพัฒนาลักษณะภูมิประเทศ และการชะล้างพังทลายผิวพื้นพิภพลดต่ำลง จนถึงระดับน้ำทะเลจะพัฒนาเป็นขั้นตอน (stage) ตามลำดับ

2. ข้อมูลที่ได้จากแผนที่และข้อมูลทางสถิติที่ได้จากหน่วยงานต่าง ๆ ถือว่าถูกต้องและเชื่อถือได้

3. องค์ประกอบทางธรณีสัฐานอื่น ๆ ที่นอกเหนือไปจากที่ใช้ในการศึกษาถือว่าไม่มีผลต่อการศึกษาค้างนี้

4. ตัวแปรที่ใช้ศึกษา (random variable) ทุกตัวแปร ถือว่าต่างก็เป็นอิสระต่อกัน

เกณฑ์ในการเลือกบริเวณที่ศึกษา

1. ลักษณะของแม่น้ำที่เป็นลำน้ำแบบคดเคี้ยว (Meander stream) อย่างแท้จริง

2. เป็นลำน้ำที่มีทะเลสาบรูปแอก มากกว่าลำน้ำสายอื่น ๆ ในประเทศ

3. บริเวณที่ศึกษาเป็นช่วงที่ลำน้ำมีทะเลสาบรูปแอกหนาแน่นมากที่สุด

4. ลักษณะภูมิประเทศที่ลำน้ำไหลผ่านเป็นที่ราบเกิดจากการชะล้างพังทลายกัดกร่อนพื้นผิวลดระดับต่ำลง

5. เป็นบริเวณที่ลำน้ำไหลผ่านดินและหินพื้นฐานที่มีโครงสร้างและชนิดเดียวกัน ตลอดจนได้รับอิทธิพลจากภูมิอากาศเหมือนกัน

อธิบายศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการศึกษา

ทะเลสาบรูปแอก (Oxbow lakes) หมายถึง บึงโค้งหรืออูก ซึ่งเป็นส่วนโค้งของร่องน้ำเก่าที่ถูกตัดออกจากร่องน้ำปัจจุบัน มีลักษณะเป็นบ่วงโค้ง คล้ายเกือกม้าหรือแอกวัวและมีน้ำขังอยู่

การเกิดทะเลสาบรูปแอก หมายถึง การพัฒนาปรับสภาพลำน้ำแบบคดเคี้ยว จนร่องน้ำไหลตัดทะเลสาบคดคองน้ำ (Meander Cutoff) ทิ้งซากของลำน้ำเก่าที่เป็นร่องน้ำรูปแอก ภายในท้องที่ประกอบทางธรณีสัณฐานสภาวะหนึ่ง

องค์ประกอบทางธรณีสัณฐาน หมายถึง ความลาดชันด้านข้างลำน้ำ ระดับของทะเลสาบรูปแอก ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอก ความคดเคี้ยวลำน้ำ มุมร่องน้ำโค้ง รัศมีความโค้ง ลักษณะดิน ขอบเขตลำน้ำ ความกว้างลำน้ำ ขวงยาวลำน้ำ ระยะทางของทะเลสาบรูปแอกและช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก

ความลาดชันด้านข้างลำน้ำ (Valley side slope) หมายถึง อัตราส่วนของความสูงต่าง ต่อระยะทางแนวราบระหว่างที่ตั้งของทะเลสาบรูปแอกกับแนวสันปันน้ำ (divide) ที่อยู่ฝั่งเดียวกันของแม่น้ำ

ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอก (Oxbow - lake Slope) หมายถึง อัตราส่วนของความต่างระดับระหว่างทะเลสาบรูปแอกที่ใกล้กันที่สุด ตามทิศทาง การไหลของลำน้ำ ต่อระยะทางราบระหว่างโค้งของทะเลสาบที่หาความต่างระดับ

ความคดเคี้ยวของลำน้ำ (Sinuosity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง ระยะทางที่วัดไปตามลำน้ำ ต่อระยะทางที่วัดไปตามแกนของขอบเขตลำน้ำ

(Axis of meander belt)

มุมร่องน้ำโค้ง (Channel arc angles) หมายถึง ค่าของมุมที่วัดได้จากแกนของขอบเขตลำน้ำกับแนวโค้งร่องน้ำ (Channel arc)

รัศมีความโค้ง (Radius of curvature) หมายถึง ความยาวเฉลี่ย จากจุดกลางของแกนหัวโค้ง (Axis of bend) ไปยังแกนกลางร่องน้ำรอบหัวโค้ง ลำน้ำ

ระดับของทะเลสาบรูปแอก (Relief of Oxbow - lake) หมายถึง ความต่างระดับระหว่างที่ตั้งของทะเลสาบรูปแอก กับความสูงเฉลี่ยของสันปันน้ำที่ตัดตามขวางผ่านยอดโค้งทะเลสาบรูปแอก

ความกว้างลุ่มน้ำ/(Valley width) หมายถึง ระยะทางระหว่างสันปันน้ำที่ตั้งฉากกับทิศทางร่องน้ำ ซึ่งตัดตามขวางผ่านยอดโค้งทะเลสาบรูปแอก

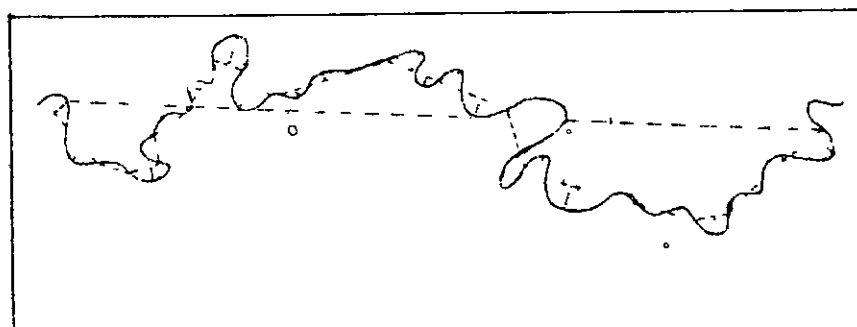
ช่วงยาวคูกน้ำ/(Meander length) หมายถึง ระยะทางแนวตรงระหว่างจุดเริ่มคูกน้ำ (Point of inflection) ไปยังจุดเริ่มอีกคูกน้ำหนึ่ง ซึ่งอยู่ถัดไป

ขอบเขตคูกน้ำ/(Meander belt) หมายถึง ระยะทางตั้งฉากระหว่างชายฝั่งคานโค้งเว้าไปยังชายฝั่งคานโค้งเว้าของคูกน้ำถัดไป

ระยะทางของทะเลสาบรูปแอก หมายถึง ระยะทางตั้งฉากจากแกนกลางลุ่มน้ำ (Axis of Valley) ไปยังยอดโค้งของทะเลสาบรูปแอก

ช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก (Oxbow lake Interval) หมายถึง อัตราส่วนของระยะทางระหว่างปลายบน ไปยังอีกปลายบนของทะเลสาบรูปแอกที่อยู่ถัดไปตามลำน้ำตอนล่าง ต่อระยะทางตรงจากยอดโค้งของทะเลสาบรูปแอกไปยังร่องน้ำที่ใกล้ที่สุด

ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างของลำน้ำ

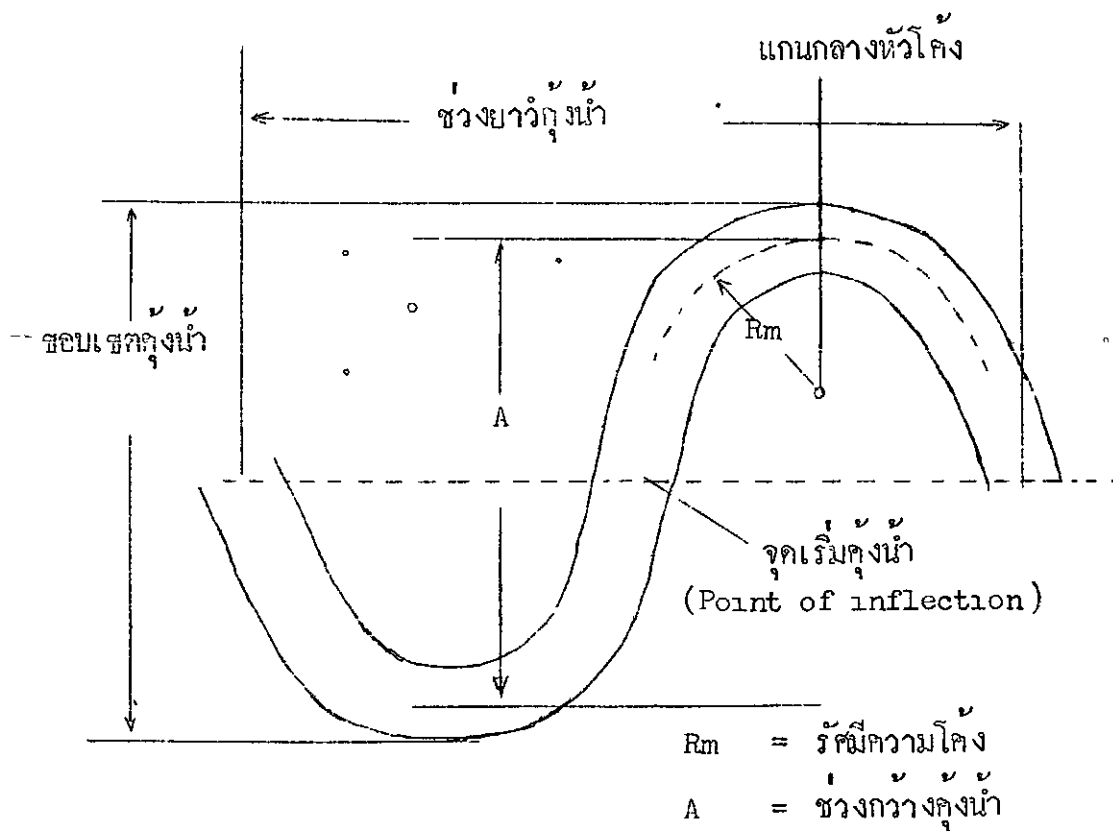


———— เส้นแกนกลางลำน้ำ

----- แกนกลางลุ่มน้ำ

----- แกนกลางขอบเขตลุ่มน้ำ

..... ความสูงแนวโค้งร่องน้ำ



ภาพที่ 4 แสดงโครงสร้างโค้งน้ำ

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับพัฒนาการของลักษณะภูมิประเทศ และวิวัฒนาการของลำน้ำแบบคอคเคียวจนเกิดเป็นบึงโค้งหรือทะเลสาบรูปแอก (Oxbow Lakes) ทั้งนักภูมิศาสตร์และนักธรณีสัณฐาน ได้สนใจศึกษากันอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีผลงานการศึกษาค้นคว้าและเอกสารการวิจัยที่เป็นแนวทางในการศึกษาดังนี้

✓ เดวิส (Davis) ให้เหตุผลและแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับการจำแนกการกำเนิดลักษณะภูมิประเทศว่า ลักษณะโครงสร้าง (structures) ทั้งภายในภายนอกเป็นพื้นฐานสำคัญในการจำแนกภูมิประเทศ ในกรณีที่ไม่มีความการใด ๆ กระทำต่อพื้นผิว โครงสร้างภายในจะเป็นปัจจัยควบคุมลักษณะภูมิประเทศ แต่ไม่มีผิวพื้นส่วนใดที่ไม่ได้รับการกระทำจากขบวนการต่าง ๆ ฉะนั้นขบวนการปรับระดับ (denudation processes) จึงเป็นตัวการหนึ่ง แต่ขบวนการทั้งหลายไม่สามารถกระทำให้สำเร็จทันทีทันใด ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของขบวนการทำลายและเสริมสร้างต้องอาศัยช่วงระยะ นั่นคือ เวลา (time) จึงเป็นอีกปัจจัยที่ใช้ศึกษาเกี่ยวกับการกำเนิดภูมิประเทศ ซึ่งแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 L &= f (SPT) \quad \text{เมื่อ} \\
 L &= \text{ลักษณะภูมิประเทศ (Landform)} \\
 S &= \text{โครงสร้างหิน (Structure)} \\
 P &= \text{ขบวนการกระทำ (Processes)} \\
 T &= \text{เวลา (Time)}
 \end{aligned}$$

โดยเฉพาะเดวิสเชื่อว่า การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อมีสภาวะแรกเริ่ม (Initial condition) ภายหลังจากการยกตัว (uplift) ที่สมบูรณ์แล้ว ลักษณะการ

กำเนิดภูมิประเทศจากการกระทำของขบวนการต่าง ๆ มีลำดับการเปลี่ยนแปลง (consequent) เป็นขั้นพัฒนาตอนต้น (Youth stage) ขั้นพัฒนาเต็มที่ (Maturity stage) และขั้นพัฒนาตอนปลาย (Old Age stage) โดยพิจารณาจากลักษณะสัณฐานภูมิประเทศที่ปรากฏ (end products) ถ้าไม่มีเหตุการณ์ใดอุบัติขึ้นขัดขวาง (interruption) วัฏจักรแห่งการสึกกร่อน การกำเนิดและการเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศจะสิ้นสุดลงเมื่อพื้นทวีปปรับระดับ (graded) ได้สมบูรณ์ถึงแนวระดับน้ำทะเล (Base level) จะปรากฏเห็นที่ราบในอุดมคติ (Peneplain) ซึ่งเป็นลักษณะภูมิประเทศเข้าถึงสภาวะสมดุลย์ (states of Equilibrium) (Davis, 1909 : 481) สตราเลอร์ (Strahler) กล่าวว่า การกระทำทางธรณีวิทยาของลำน้ำประกอบด้วย 3 ขบวนการที่สัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด คือ การกัดกร่อนพังทะลาย (erosion) การพัดพาขนย้าย (transportation) และการทับถม (deposition) เรสส์ (Raize) ได้จำแนกลำดับการเปลี่ยนแปลงลำน้ำเป็นขั้นพัฒนาดังนี้

1. ขั้นแรกเริ่ม (Initial stage) มีทะเลสาบ น้ำตก และแก่งน้ำไหล (Rapids)
2. ขั้นมัชฌิมวัยหนุ่ม (Middle Youth) ทะเลสาบหายไป แต่ น้ำตกและแก่งน้ำไหลเขี่ยยังคงมีอยู่ตามโกรกธาร (canyon) แคบ ๆ
3. ขั้นเริ่มแรกของช่วงพัฒนาเต็มที่ (Early maturity) ลักษณะภาพตัดตามยาวของลำน้ำจะปรับระดับราบเรียบไม่มีน้ำตกหรือแก่งน้ำไหล แต่เริ่มกำเนิดที่ราบน้ำท่วมถึง (Flood plain)
4. ขั้นเกือบเข้าถึงพัฒนาเต็มที่ (Approaching full maturity) ลักษณะลำน้ำมีที่ราบน้ำท่วมกว้าง เหมาะสมเพียงพอที่ลำน้ำพัฒนาเป็นคูกน้ำได้
5. ขั้นพัฒนาเต็มที่ (Full maturity) ภูมิประเทศเป็นที่ราบน้ำท่วมถึงกว้างใหญ่ พัฒนาการของคูกน้ำเป็นไปอย่างอิสระ เกิดทะเลสาบรูปแอก

เห็นที่ราบคันทะกอนและคันทันธรรมชาติอย่างเด่นชัด (Strahler, 1969 : 445)

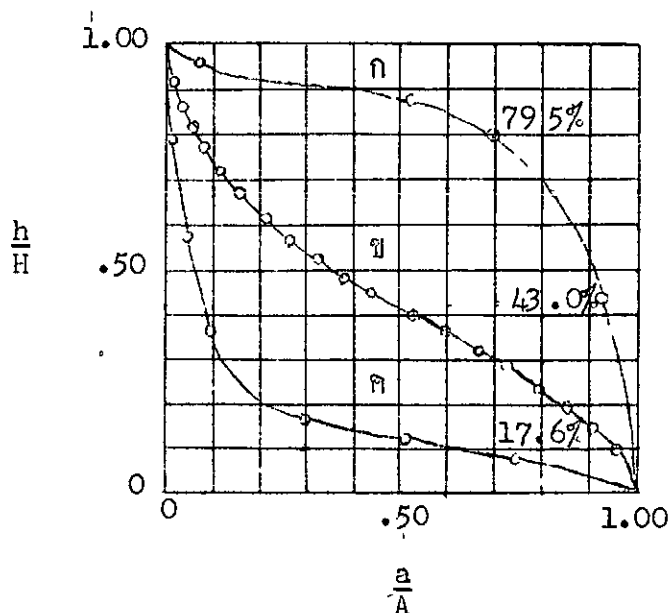
ธอร์นเบอร์รี่ (Thornbury) ให้ความเห็นว่าการกัดเซาะพังทะลาย
ด้านข้าง (lateral erosion) เป็นขบวนการเพิ่มขยายความกว้างลุ่มน้ำและลด
พื้นที่ระหว่างลำน้ำ (interstream) ลง การผันแปรของความสูง (altitude)
ภูมิประเทศ โครงสร้างทางธรณีวิทยา (Geologic structure) ขบวนการ
เคลื่อนไหวของเปลือกโลก (diastrophic) และสภาวะภูมิอากาศ (climatic
condition) เป็นสิ่งที่ศึกษาได้จากลำดับการเปลี่ยนแปลงของลักษณะภูมิประเทศ
ที่ปรากฏเห็นได้เป็นต้นว่า

1. ลักษณะภูมิประเทศขั้นต้น (Youth stage) ลำน้ำสาขาสั้น ๆ
และมีน้อย การพังทะลายต้นน้ำ (Head ward erosion) รุนแรงและภาพ
ตัดขวางของลุ่มน้ำมีลักษณะรูปตัววี (V - shape) ความชันลึกของลำน้ำอยู่ที่ความ
สูงของบริเวณเหนือระดับน้ำทะเล แนวสันปันน้ำกว้างจึงกำหนดให้แน่นอนได้
ลำบาก

2. ขั้นพัฒนาเต็มที่ (Maturity stage) ลักษณะลุ่มน้ำ
(Valley) ขยายกว้างออกจนเกิดระบบการระบายน้ำรวมเป็นระบบเดียวกัน
ที่ราบน้ำท่วมที่เกิดขึ้นสามารถที่จะพิจารณาได้สักระยะกับพื้นลุ่มน้ำ (valley floor)
ความคดโค้งของลำน้ำเกินสะกดตามมีอิสระที่จะเคลื่อนย้ายไปทั่วที่ราบน้ำท่วมและ
ความกว้างของพื้นลุ่มน้ำจะไม่กว้างเกินไปกว่าความกว้างขอบเขตลำน้ำ
(Meander belt)

3. ขั้นปัจฉิมวัย (Old Age stage) ลักษณะลุ่มน้ำกว้าง
เว้ากว้างที่สุดและความลาดชันน้อยมาก โดยเฉพาะความกว้าง ลุ่มน้ำจะใหญ่กว่า
ความกว้างขอบเขตลำน้ำ พื้นที่ส่วนใหญ่เกิดการชะล้างตะกอนผิวหน้า (Mass-
wasting) และความสูงต่ำของพื้นผิวจะใกล้เคียงกับระดับฐานการพังทะลาย
(base of erosion) (Thornbury, 1969 : 135 - 139)

สตราเลอร์ (Strahler) ได้ศึกษาขั้นตอนของการพัฒนาภูมิประเทศด้วยการวิเคราะห์แบบฮิพโซเมตริก (Hypsometric Analysis) เพื่อทราบวิัจกรทางธรณีสัณฐานพบว่า ลำดับพัฒนาการในกราฟที่ 1 ก. ที่ได้จากที่ราบชายฝั่งแมรีแลนด์ (Maryland coastal plain) อยู่ในขั้นตอนต้นของวิัจกรค่าพื้นผิวดินที่เหลือจากการกัดกร่อนพังทะลายสูงถึง 79.5% หรือ พื้นดินถูกกัดกร่อนไปแล้วเพียง 20.5% ลักษณะเส้นกราฟจะโค้งมนโดยตลอด แต่ตอนปลายใกล้บนสุดจะโค้งเว้าเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงลักษณะสันปันน้ำเป็นบริเวณพื้นที่กว้าง กราฟที่ 1 ข. แสดงลักษณะแอ่งระบายน้ำในขั้นพัฒนาสมบูรณ์เต็มที่ (Full mature) ของทิวเขาเวอร์ดูกโก (Verdugo Hills) ทางภาคใต้ของแคลิฟอร์เนีย จะเห็นว่าเส้นกราฟเป็นรูปตัวเอส (S) ค่าพื้นผิวดินที่เหลือจากการกัดเซาะ 43% แต่ในตอนปลายของมัตูริตี (Late Maturity)



กราฟที่ 1 แสดงHypsometric curve ของพื้นดินที่ถูกกัดกร่อนระยะต่าง

หรือขั้นปัจฉิม (Old stage) ของการพัฒนภูมิประเทศ ลักษณะเส้นกราฟและค่าที่คำนวณได้จะไม่แตกต่างจากขั้นมัชฌิมวัย (maturity) อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีลักษณะภูเขาโดด ๆ (monadnocks) เหลืออยู่ ดังเช่นแอ่งระบายน้ำในภาคใต้ของอะลาบามา (Alabama) บริเวณที่ลุ่มต่ำของหินดินดานและหินปูนพวกดุษพังงาย่อมมีภูเขาโดดหินทราย ผลจากการศึกษาบริเวณดังกล่าว จะเห็นว่าลักษณะเส้นกราฟโค้งเว้า (กราฟที่ 1 ก.) ค่าพื้นที่ที่เหลือจากการถูกกัดกร่อนเพียง 17.6% หรือมีพื้นดินถูกกัดเซาะพังทลายไปแล้ว 82.4% ถ้าภูเขาโดดหายไปค่าอินทิเกรต (integral) ที่คำนวณได้อาจเพิ่มขึ้นเป็น 40 - 60% และสตราเลอร์ได้สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ว่า

1. พัฒนาการแอ่งระบายน้ำตามวัฏจักรประกอบด้วยขั้นตอนของการพัฒนาที่สำคัญเพียง 2 ขั้นเท่านั้น คือ ขั้นไม่สมดุลของการพัฒนาแรกเริ่ม (Inequilibrium stage of early development) และขั้นสมดุล (Equilibrium stage)
2. บริเวณหินแข็งเก่า (massive) ที่เป็นโกรกซาร์ (conyon) จนเกือบเป็นหน้าผา ค่า Hypsometric Integral จะสูงและลดลงตามลำดับ ส่วนความสูงต่ำของแอ่งระบายน้ำ (Drainage basin) ที่ลดระดับลง (Strahler, 1952 : 1117 - 1142) บพิตร ได้ศึกษาลักษณะการระบายน้ำและผลที่มีต่อลักษณะภูมิประเทศของลำเซในลุ่มน้ำมูล พบว่าระยะจักรของลักษณะภูมิประเทศบริเวณลำน้ำเซบก อยู่ในขั้นปัจฉิมวัย (Old age) พื้นที่ที่เหลือจากการกัดกร่อนของลำน้ำ 12.8307% หรือพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนโดยลำน้ำไปแล้ว 87.1693% (บพิตร, 2516 : 63)

ยอกซอล (Yoxall) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนสู่ระดับฐานของการพังทลาย (falling base level) กับการพังทลายด้านข้าง

(lateral erosion) ด้วยการสร้างลำน้ำจำลอง 12 สาย แต่ละสายยาว 16 ฟุต กว้าง 2 ฟุต ลึก 1 ฟุต และสูงจากระดับน้ำทะเล 12 เซนติเมตร ไหลผ่านวัตถุหินทรายจากธารน้ำแข็ง (glacial sand) และพูมิส (Pumice) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพังทลายกับอัตราการกัดกร่อนลงสู่ระดับน้ำทะเล หาได้จากสมการ

$$R_e = cR_s + d$$

เมื่อ R_e = อัตราการพังทลาย (Rate of erosion)

R_s = อัตราการกัดกร่อนลงสู่ระดับน้ำทะเล
(Rate of sea level drop)

c, d = ค่าคงที่จากการทดลอง

และอัตราการกัดกร่อนลงสู่ระดับฐานการพังทลาย (Rate of base level drop or Rate of sea - level drop) กับอัตราการพังทลายด้านข้าง (Rate of lateral erosion) ได้จากสมการ

$$E = aT + b$$

เมื่อ E = การพังทลาย (Erosion)

T = ระยะเวลาที่น้ำไหล (Running time)

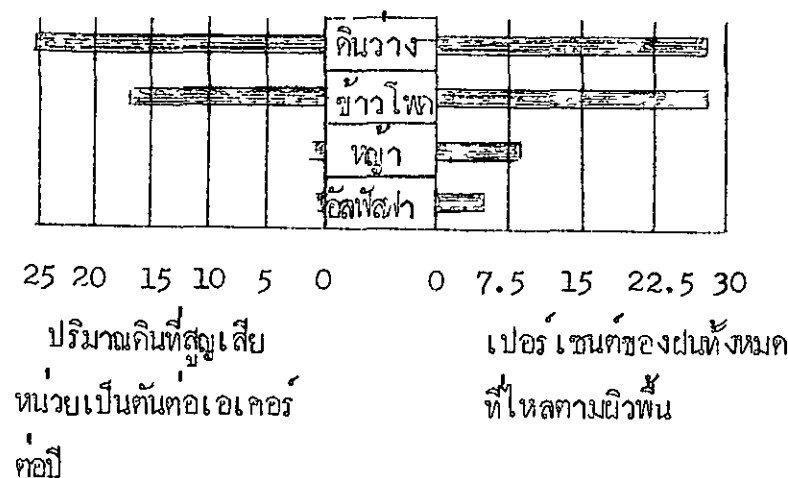
a, b = ค่าคงที่

จากการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการพังทลายกับอัตราการกัดกร่อนลงสู่ระดับน้ำทะเล (R_s) 9.6 นิ้วมิลต่อเซนติเมตร ความลาดชันร่องน้ำ (gradient) ถูกกำหนดโดยปริมาณน้ำไหลออกกับวัตถุท้องธาร เมื่อลำน้ำมีความยาวเต็มที่ (full length) ค่าความลาดชันร่องน้ำจะคงที่ แต่จะเพิ่มขึ้นหลังจากลำน้ำคดโค้งบรรจบตักทะเลกัน ซึ่งการเพิ่มความลาดชันจะสัมพันธ์กับที่ตั้ง

ของระดับน้ำทะเล (sea - level position) แต่ไม่สัมพันธ์กับอัตราการลดระดับลงสู่ระดับน้ำทะเล และภายใต้ขอบเขตการทดลองตามสภาวะดังกล่าว ยอกซอล (Yaxall) สรุปผลการทดลองไว้ว่า

1. ลำน้ำที่มีความยาวคงที่ ปริมาณน้ำไหลกับอัตราลดระดับฐานของการพังทลายและอัตราการพังทลายด้านข้างจะคงที่
2. ลำน้ำที่มีความยาวและปริมาณน้ำไหลคงที่ อัตราการพังทลายด้านข้าง แปรผันโดยตรงกับอัตราลดระดับลงสู่ฐานการพังทลาย
3. การพังทลายด้านข้างของแม่น้ำสัมพันธ์กับพัฒนาการของภาพตัดตามยาวไปสู่สภาวะสมดุลย์ของแม่น้ำ (Yoxall, 1969 : 1379 - 1384)

ในการศึกษาอัตราการพังทลายของสหรัฐอเมริกา พบว่า อัตราการพังทลายกักกร่อนต่ำลงโดยเฉลี่ยประมาณ 6 เซนติเมตรต่อ 1,000 ปี หรือ 1 เซนติเมตรต่อ 166 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุตะกอนของหิน (Rock material) ที่พัดพาลงสู่ทะเล ดังนั้นตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์จนถึงปัจจุบันชั้นวัตถุจากการพพังของหินหนากว่า 60 เซนติเมตร ได้ถูกชะล้างพัดพาลงสู่ทะเล แต่การลดระดับไปถึงสภาวะที่ราบในอุคมคติ (Peneplain) ต้องใช้เวลา 15 - 100 ล้านปี ทั้งนี้อยู่ที่ความสูงตอนแรกเริ่มกับชนิดของหินพื้นฐาน ปริมาณน้ำฝนและองค์ประกอบอื่นๆ (Skinner, 1974, 143) จากการทดลองอัตราการชะล้างผิวดินเป็นแผ่น (rate of sheet erosion) กับการปกคลุมของพืชบนดินซิลต์ (silt soil)



กราฟที่ 2 แสดงปริมาณดินที่สูญเสียและปริมาณน้ำฝนไหลตามผิวพื้นที่ปกคลุมด้วยพืชต่างชนิดกัน

ที่ลาดชัน 8 ฟุตต่อ 100 ฟุต และได้รับปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี 40 นิ้ว ของสถานีเบธานี (Bathany) มลรัฐมิสซูรี (Missouri) (กราฟ 2) จะเห็นว่าบริเวณที่ปกคลุมด้วยหญ้าธรรมชาติและหญ้าแอลฟาฟ่า (Alfalfa) สามารถควบคุมอัตราการชะล้างผิวหน้าเกือบ 300 เท่าของพืชที่ปลูกเป็นแถว เช่น ข้าวโพด และอัตราการสูญเสียผิวดินเนื่องจากการพังทลายบริเวณดินว่างเปล่า (bare soil) ประมาณ 1.5 ฟุต ต่อ 100 ปี (Longwell, 1958 : 141)

ลำน้ำปรับตัวเปลี่ยนแปลงลักษณะสัณฐานตลอดเวลา ดังนั้นแรงน้ำไหลจึงเป็นตัวการสำคัญของระยะการกัดกร่อนพังทลาย ทำให้ความสูงของพื้นผิวพลตกต่ำลงสู่สภาวะสมดุลย์ (state of equilibrium) ที่อัตราการพังทลายเท่ากับอัตราการพัดพาขนย้ายและลักษณะลำน้ำถึงสภาวะปรับระดับอยู่ตัว (graded stream) ไม่มีทั้งการพังทลายและการทับถม การปรับสภาพ

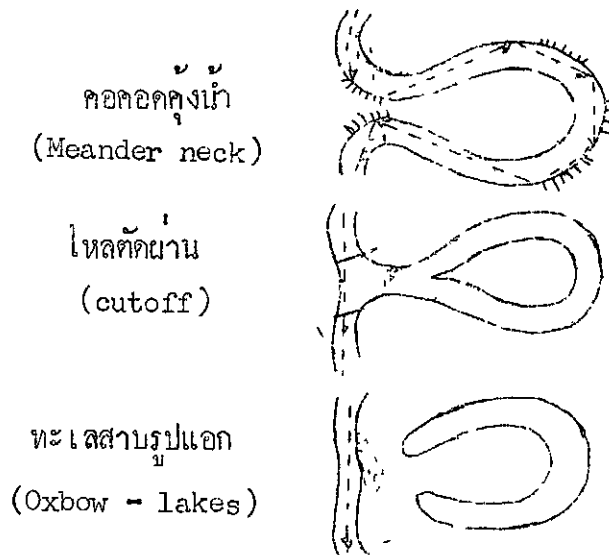
เปลี่ยนแปลงสถานะของลำน้ำ จึงสัมพันธ์กับพัฒนาการลักษณะภูมิประเทศโดยตรง (Sawkin, 1974 : 350) เกี่ยวกับการศึกษาและวิจัยวิวัฒนาการของลำน้ำ เพื่อปรับสภาพเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ มีผลงานศึกษาอย่างกว้างขวางเช่น

ตัน (Ton) กล่าวถึงปัญหาสำคัญที่จะต้องศึกษาเกี่ยวกับลักษณะคูกน้ำ และบึงโค้ง หรือทะเลสาบ รูปแอก สิ่ง ที่ควรพิจารณาอันดับแรกคือรูปลักษณะ (aspect) ทางเรขาคณิตที่แปรผันกับมิติร่องน้ำ และจากการศึกษาเกี่ยวกับธรรมชาติคูกน้ำ (Meander habit) ในบริเวณคูกน้ำคั่นตะกอน ของแม่น้ำที่เกิดจากธารน้ำแข็ง ตัน (Ton) สรุปไว้ว่า

1. ลักษณะคูกน้ำและองค์ประกอบโครงสร้างของคูกน้ำจะรักษาสัดส่วนซึ่งกันและกัน และเป็นสัดส่วนกับขนาดร่องน้ำด้วย
2. ปริมาณน้ำไหลออก (discharge) และตะกอนพัดพา มีความสำคัญต่อพัฒนาการรูปทรงคูกน้ำ นั่นคือ ลักษณะคูกน้ำแปรผันตามปริมาณน้ำไหลออกกับตะกอนพัดพา และเป็นสัดส่วนกับมิติร่องน้ำโดยตรง
3. ปริมาณน้ำไหลออก เนื่องจากหิมะละลาย เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดความกว้างร่องน้ำ (Channel width) แต่อย่างไรก็ตามความกว้างร่องน้ำไม่ใช่ปัจจัยสำคัญที่สุด ที่มีผลต่อการก่อตัวคูกน้ำ (David Ton, 1972 : 201 - 214)

ฟลินท์ (Flint) ให้เหตุผลว่า คูกน้ำจะขยายตัวอย่างรวดเร็ว ตามพื้นลาดคูกน้ำไปสู่ปากแม่น้ำ ถ้าวัตุกรรมฝั่งเหมือนกันคูกน้ำทั้งสองข้างจะคดโค้งเท่ากันและเคลื่อนย้ายในอัตราเดียวกัน แต่เนื่องจากวัตุกรรมฝั่งคุณสมบัติไม่เหมือนกัน การเคลื่อนย้ายของคูกน้ำบริเวณความต้านทานแข็ง (resistant) จึงช้ากว่า ในขณะที่ปลายคูก (limb) อีกด้านหนึ่งที่ความต้านทานอ่อนจะเคลื่อนย้ายได้เร็วกว่า ก่อตัวเป็นคอคอกคูกน้ำ (Neck cut off) จนบรรจบปลายคูกที่เคลื่อนที่ช้า (slow limb) ร่องน้ำจึงไหลตัดทะลุผ่านปลายโค้งทั้งสองของลำน้ำ เกิดเกาะระหว่าง

ร่องน้ำและเกิดการทับถมของตะกอนพัดพา (suspended load) ที่ปลายโค้งตัดขาด เป็นบึงโค้งรูปพระจันทร์เสี้ยว (crescent shape) (รูป 5) จากการศึกษา

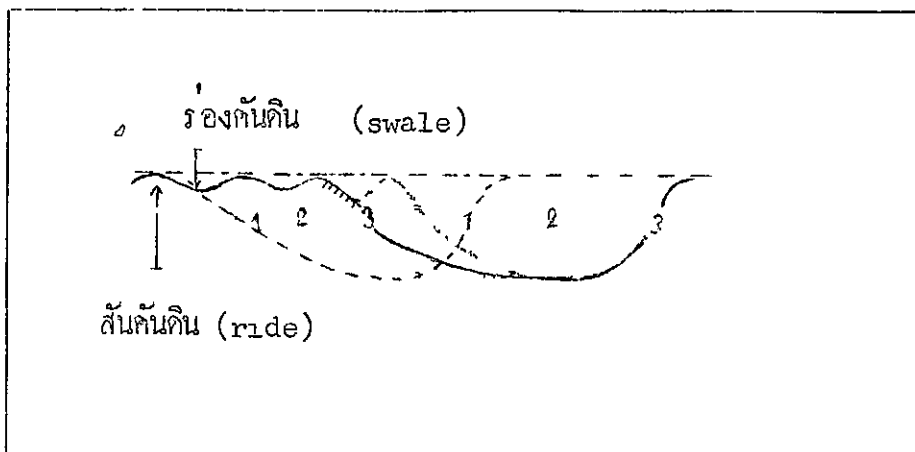


ภาพที่ 5 แสดงลำน้ำแบบคดเคี้ยวไหลตัดผ่านคอคอดคู้งน้ำเป็นทะเลสาบรูปแอก

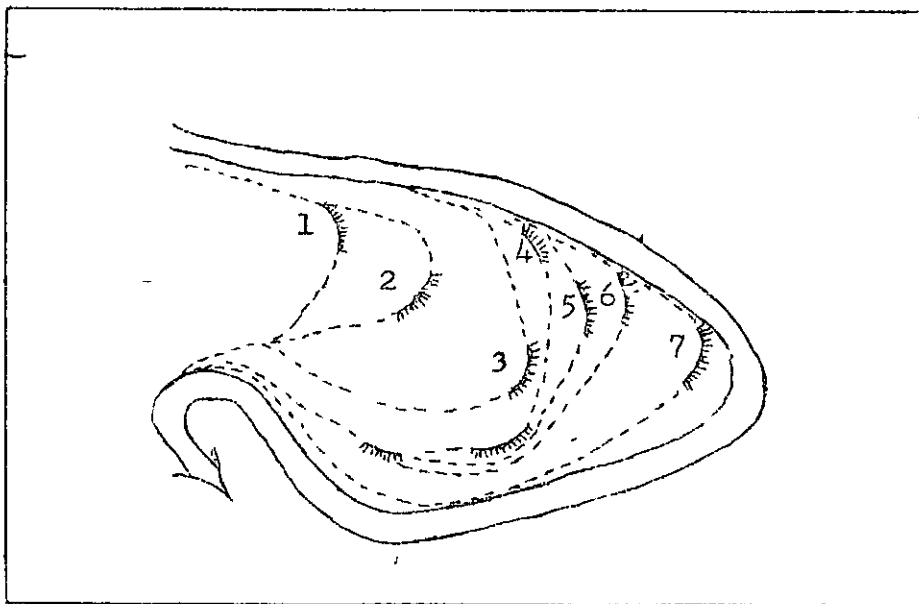
ส่วนของร่องน้ำมีสัณฐานที่ถูกลูกตัด (cut off) เป็นทะเลสาบรูปแอก ตั้งแต่ปี 1776 ถึงปัจจุบันพบว่า มีความยาวรวมกันกว่า 230 ไมล์ แต่แม่น้ำไม่ได้สั้นลง เพราะรักษาสมดุลโดยการขยายคู้งน้ำส่วนอื่น ๆ (Flint, 1974 : 134 - 146)

✓ ฮิกกิน (Hickin) ได้ศึกษาพัฒนาการของร่องน้ำแบบคดเคี้ยว ในที่ราบน้ำท่วมของแม่น้ำบีทตัน (Beaumont River) ซึ่งไหลผ่านพื้นที่ตะกอนทับถมจากธารน้ำแข็งที่ลาดชันเฉลี่ยเพียง 0.0016 เมตร และมีพื้นที่รับน้ำ 16,000 ตารางกิโลเมตร โดยอาศัยแผนที่และภาพถ่ายทางอากาศ ผลการศึกษาพบว่า การกำเนิดสันทรายปลายโค้งหรือสันทรายคู้งน้ำ (Scroll bars or Meander scroll) ในช่วงระยะปริมาณน้ำสูงสุด สันทรายจะทับถมฝั่งด้านโค้งนูน (Convex) ขยายเป็น

แนวทิวสันคันทินมีพีชปกคลุมเป็นผืนใหม่ ช่วงระยะปริมาณน้ำลดต่ำเกิดการกัดเซาะ ส่วนล่างของชายฝั่งโค้งเว้า (Concave) พังทะลายเลื่อนทรุดต่ำลง ทำให้ร่องน้ำ เคลื่อนย้าย จากการทับถมมากน้อยตามตะกอนและปริมาณน้ำกับการเคลื่อนย้าย ร่องน้ำ ทำให้เกิดสันคันทิน (ride) และร่องคันทิน (swale) ต่อเนื่องเป็นรูปแบบ (Pattern) (รูปที่ 6-7) ความสัมพันธ์ของรัศมีสันคันทิน (Radius of ride) และความโค้งร่องคันทิน (Swale curvature) ตอนเริ่มก่อตัวคูก้น้ำ กว้าง 1,000 เมตร ภายหลังการพัฒนาขยายมากขึ้น รัศมีความโค้งลดลงเหลือ เพียง 200 เมตร ฉะนั้นการศึกษาสันทรายคูก้น้ำ ไม่เพียงแต่ทำให้ทราบการขยาย ตัวของคูก้น้ำกับการพังทะลายก้นช่วงและอัตราการเคลื่อนย้ายเฉลี่ยของร่องน้ำ เท่านั้น แต่ยังสามารถศึกษาอัตราความโค้งของคูก้น้ำ และอัตราการทับถมของ ตะกอนบนที่ราบน้ำท่วมไคควย (Hackin, 1974 : 414 - 442) ในทำนอง เดียวกัน ฟรายคิน (Friedkin) ได้ศึกษาพัฒนาการความคดเคี้ยวของลำนน้ำ จำลอง พบว่า ธรรมชาติการไหลตัดผ่านร่องน้ำ (Cutoff) เนื่องจากความ แตกต่างทางสมรรถนะ ดินตามฝั่งลำนน้ำในท้องถิ่นที่สามารถจะพังทะลายได้ ปัจจุบัน กำหนดช่วงกว้างคูก้น้ำ (Meander amplitude) ได้แก่ การแจกกระจายของ แรงเสียดทาน (Shear friction) ปะทะร่องน้ำ ลักษณะที่ราบดินตะกอน น้ำท่วมและการพัดพาตะกอน อัตราการเคลื่อนย้ายของลำนน้ำส่วนล่าง (downstream) จะสัมพันธ์กับอัตราการเติบโตของช่วงกว้างคูก้น้ำ ความสัมพันธ์ ระหว่างความกว้างร่องน้ำ (Channel width, W) ต่อช่วงยาวคูก้น้ำ (Meander length, L_m) ได้ $L_m = 10.9 W^{1.01}$ และอัตราส่วนรัศมีความโค้ง ของคูก้น้ำ (Radius of curvature, R_m) ต่อความกว้างร่องน้ำ (W) ได้ $R_m/W = 2.3$ ฟรายคินยังให้เหตุผลเพิ่มอีกว่า การเปลี่ยนแปลงทั้งขนาด และปริมาณของตะกอนเป็นสาเหตุของขบวนการเสริมสร้างปฏิมากรรมและขบวนการ



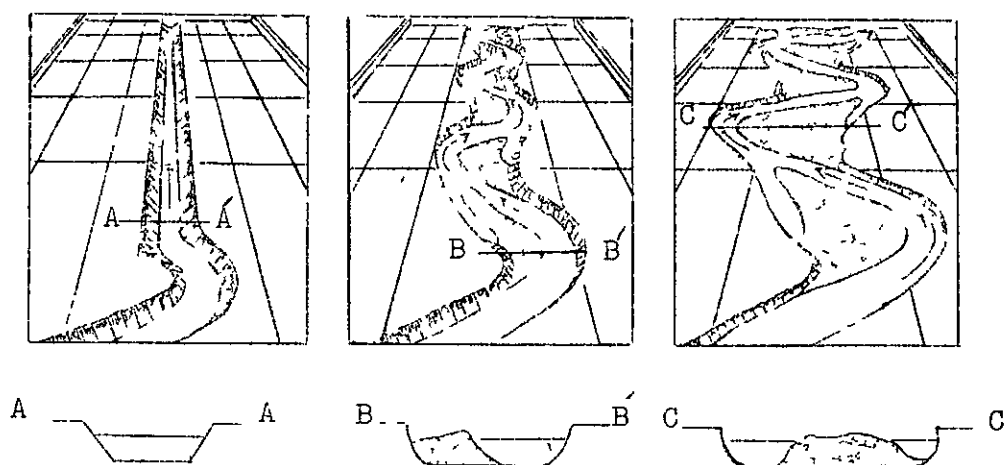
ภาพที่ 6 แสดงการเกิดสันคันดินและร่องคันดินกับการเคลื่อนย้ายร่องน้ำ



ภาพที่ 7 แสดงลำน้ำพัฒนาการ ขยายรั้วมีสันคันดินและความโค้งร่องคันดิน

ลระดับ ซึ่งส่งผลให้ความลาดชันร่องน้ำและขนาดลำน้ำเพิ่มขึ้น การแปรผันของปริมาณน้ำไหลออกกับความลาดชัน ทำให้มีคิคุ่งน้ำแปรเปลี่ยนไป เมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้น พบว่า ทั้งช่วงยาวคิคุ่งน้ำ (Wave length) และความกว้างของหัวคิคุ่งน้ำ (Width of meander bond) จะเพิ่มขึ้น (Hickin, 1974 : 423) การศึกษาของ แบกนอลด์ (Bagnold) ได้ให้เหตุผลสนับสนุนว่าปัจจัยสำคัญของการเกิดคิคุ่งน้ำ คือ การกักร่อนพังทะลายริมฝั่งและท้องน้ำ ซึ่งจะสัมพันธ์กับพลังงานน้ำไหลและการเกิดทิวสันทรายฝั่งก้นคิคุ่งน้ำ ตามลำดับปริมาณ การเปลี่ยนแปลงตะกอน (Hickin, 1974 : 425)

การทดลองพัฒนาการคิคุ่งน้ำในแม่น้ำจำลองของสถานีทดลองทางน้ำ สหรัฐอเมริกา (U.S. Waterway Experimen Station) (รูปที่ 8) จะเห็นว่าร่องน้ำขั้นแรก (Initial channel) ไหลผ่านพื้นผิวดินทรายยาว 50 ฟุต และมีความลาดชันน้อย ลักษณะภาพตัดตามขวางของร่องน้ำจะเห็นได้จากรูป AA' หลังจากปล่อยให้น้ำไหลผ่านไป 3 ชั่วโมง กระแสน้ำกัดเซาะริมฝั่งด้านนอกใกล้ B' และนำทรายที่กัดเซาะไปทับถมเป็นสันทราย ตามฝั่งด้านเดียวกันที่อยู่ห่างลงไปตามลำน้ำตอนล่าง ซึ่งเป็นสาเหตุให้คิคุ่งน้ำก่อตัวต่อเนื่องกันไป การกระทำเช่นเดียวกันนี้ทำให้เกิดคิคุ่งน้ำอื่น ๆ ตามลำน้ำตอนล่างภาพตัดขวางร่องน้ำจะไม่เท่ากัน ดังรูป BB' และภายหลังจากปล่อยให้น้ำไหลผ่านไป 6 ชั่วโมง คิคุ่งน้ำและสันทรายขยายใหญ่ยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการเกิดสันทราย แสดงให้เห็นว่าลำน้ำมีสมรรถนะต่ำเกินกว่าที่จะพัดพาขนย้ายตะกอนไปได้ (Longwell, 1955: 127 - 133)



ภาพที่ 8 แสดงการพัฒนาการก้งน้ำของแม่น้ำจำลอง

เจฟเฟอร์สัน (Jefferson) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางเรขาคณิตของก้งน้ำ (Meander geometry) กับปริมาณน้ำไหลและลักษณะธรณีสัณฐานอื่น ๆ จากตัวอย่างก้งน้ำบริเวณน้ำท่วมถึง 23 แห่ง ของแม่น้ำเทนเนสซี (Tennessee River) โดยศึกษาความกว้างขอบเขตก้งน้ำ (Meander belt) ความกว้างลำน้ำ อัตราส่วนความกว้างขอบเขตก้งน้ำกับความกว้างลำน้ำ และอัตราส่วนความกว้างขอบเขตก้งน้ำกับช่วงยาวก้งน้ำ ผลพบว่า อัตราส่วนเฉลี่ยของความกว้างขอบเขตก้งน้ำต่อช่วงยาวก้งน้ำ (Mb/L_m) ได้ 1.45 ต่อมา อินกลิส (Inglis) ได้ปรับปรุงวิธีการของ เจฟเฟอร์สัน สร้างสมการขึ้น (Inglis' Equation) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ลักษณะลำน้ำและมีติ้งน้ำกับปริมาณน้ำไหลออก สรุปได้ว่า

1. ความสัมพันธ์ของขนาดก้งน้ำ (Meander size) ต่อปริมาณน้ำไหลออก ได้ค่า slope 0.45 - 0.55

2. ความกว้างของขอบเขตคูกน้ำ (Meander belt width) ช่วงยาวคูกน้ำ ความกว้างร่องน้ำ หรือขอบเขตร่องน้ำ (wetted perimeter) จะแปรผันเพียง $Q^{0.5}$ และช่วงยาวคูกน้ำเท่ากับสี่เท่าขอบเขตร่องน้ำ

3. ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงยาวคูกน้ำกับปริมาณน้ำไหลออก ช่วงระยะปริมาณน้ำไหลเต็มฝั่ง (Bank full discharge, Q_b) ช่วงยาวคูกน้ำ (L_m) $= 8.2 Q_b^{0.62}$ ($R = 0.978$, S.E. = 0.108 หรือ 25%) แต่ความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำไหลออกเฉลี่ยรายปี (Q) ช่วงยาวคูกน้ำ $= 106.1 Q^{0.459}$ ($R = 0.995$, S.E. = 0.091 หรือ 11.8%) จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานน้อยกว่าช่วงระยะปริมาณน้ำเต็มฝั่ง และความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำไหลออกสูงสุดของเดือน (month of maximum discharge) ช่วงยาวคูกน้ำ $= 80.0 Q^{0.46}$ ($R = 0.992$, S.E. = 0.065 หรือ 15%)

4. ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างคูกน้ำ (Meander width, W_m) ความกว้างร่องน้ำ (W) กับปริมาณน้ำไหลเฉลี่ยรายปีได้ $W_m = 65.8 Q^{-0.47}$ และ $W = 7 Q^{-0.46}$

ดังนั้น ปริมาณน้ำไหลที่ควบคุมช่วงยาวคูกน้ำ คือ พิสัยของปริมาณการไหลของน้ำ (range of flow) ความแตกต่างของปริมาณน้ำไหลออกสูงสุดแต่ละเดือน กับปริมาณน้ำเฉลี่ยรายปีเป็นช่วงระยะที่คูกน้ำเคลื่อนย้ายและบางแห่งความลาดชันเป็นปัจจัยควบคุมช่วงยาวคูกน้ำ อย่างไรก็ตาม การไหลเวียนของน้ำ (hydrodynamic) มีอิทธิพลต่อรูปทรงช่วงยาวคูกน้ำ (Wave form) (Carston, 1965 : 864 - 885)

ดูว์ (Dury) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของมิติคูกน้ำกับปริมาณน้ำไหลออก ช่วงระยะเต็มฝั่งจากลำน้ำ 6 สาย พบว่า ช่วงยาวคูกน้ำ (L_m) $= 36.1 Q^{0.47}$

ใกล้เคียงกับลีโอโพลด์ และวอลแมน (Leopold & Walman) ศึกษา หากเพิ่ม ปริมาณน้ำไหลออก ช่วงยาวคูกน้ำจะเพิ่มขึ้น การขยายตัวของคูกน้ำอันมาจาก ตะกอนท้องธาร (bed load) ซึ่งจะลอคคูลงกับลำน้ำชั้นปัจจุบัน และมักพบ เสมอว่าบริเวณเกิดคูกน้ำความลาดชันร่องน้ำมีน้อยมาก แต่ความจริงในสภาวะที่ เหมือนกัน แม่น้ำแบบคคโค้งอาจมีความลาดชันมากกว่าแม่น้ำที่มีหรือไม่มีคูกน้ำ กูร์ ยังให้เหตุผลอีกว่า การพังทลายของหัวโค้งคูกน้ำขึ้นอยู่กับ การกระจายความเร็ว สูงสุดในร่องน้ำ ลำน้ำไหลตรง ๆ มีความเร็วสูงสุดตรงกลางร่องน้ำ แต่ความ คดเคี้ยวของร่องน้ำทำให้ชายฝั่งด้านโค้งเว้าได้รับแรงปะทะมากกว่า จึงเพิ่มความ คดเคี้ยวและขอบเขตคูกน้ำแล้วยังเป็นสาเหตุให้คูกน้ำเคลื่อนย้ายด้วย นั่นคือการ พังทลายและการทับถมทำให้เกิดคูกน้ำ รูปแบบการไหลของกระแสน้ำเป็นขบวนการ ให้คูกน้ำไหลตัดทะลุเป็นทะเลสาบรูปแอกต่อไป (Small, 1972 : 248)

แบต (Bate) ได้ให้เหตุผลและเสนอผลการศึกษาลักษณะภูมิประเทศกับ มิติคูกน้ำในที่ราบน้ำท่วมว่า ลำน้ำกว้าง 100 ฟุต จะมีขอบเขตคูกน้ำกว้าง 1,600 ฟุต ถ้าลำน้ำกว้าง 1,000 ฟุต ขอบเขตคูกน้ำกว้าง 12,000 ฟุต ซึ่ง เป็นลักษณะลำน้ำชั้นมัธยมวัย ที่มีความลาดชันน้อยมาก (Small, 1972 : 245)

✓ แอนด์ (Handy) ได้ศึกษาช่วงเวลาตัดผ่านคอคคคูกน้ำ (Neck cut off) บนที่ราบดินตะกอน จากลำดับการขยายตัวของคูกน้ำในแม่น้ำเดสไมน์ (Des Moines River) ทางภาคตะวันออกเฉียงใต้ของมลรัฐไอโอวา (Iowa) โดยอาศัยข้อมูลจากแผนที่และภาพถ่ายทางอากาศในช่วงปี 1847 - 1967 และ กำหนดขอบเขตลงเบื้องต้นให้ช่วงกว้างคูกน้ำสูงสุด (Maximum meander amplitude) แทนขอบเขตแนวคูกน้ำ (Meander belt) แล้วสร้างสมการเพื่อหาอัตราการเคลื่อน-ย้ายคูกน้ำ

$$ds/dt = -Ks$$

เมื่อ ds/dt = อัตราของการเคลื่อนย้าย (Rate of Movement)

s = ระยะทางจากจุดสมมุติสมมุติ

K = ค่าคงที่

$$\text{หรือ } ds/s = -Kdt \quad \text{และให้ } \ln s = -Kt + c \quad \text{เมื่อ}$$

c = ค่าคงที่รวม

t เป็นเวลาแรกเริ่มของคูกน้ำ = 0 ดังนั้นช่วงเวลาคูกน้ำตัดตะลุม

$$c = \ln s_0$$

เมื่อ s_0 เป็นระยะเริ่มแรกจากจุดสมมุติ นั่นคือ

$$\ln s - \ln s_0 = -Kt \quad \text{หรือ}$$

$$s/s_0 = e^{-Kt}$$

ถ้าเราให้ T_0 และ T เป็น cut off date และ Past - cut off date
จะได้สมการ

$$\ln \frac{s}{s_0} = -K(T-T_0) \quad \text{ผลการศึกษารูปได้ว่า}$$

1. คูกน้ำของแม่น้ำแควน้อย จะขยายตัวอย่างรวดเร็วหลังจาก
ที่แม่น้ำตัดตะลุมในปี 1880 การขยายตัวของคูกน้ำเริ่มช้าลงเมื่อร่องน้ำใกล้เข้าถึง
แนวขอบเขตคูกน้ำ การเคลื่อนย้ายของคูกน้ำตอนล่าง (downstream migration
of meander) ระหว่างปี ค.ศ. 1883 - 1899 ได้ 6.6 เมตร ต่อปี แต่
ระหว่างปี ค.ศ. 1847, 1910 และ 1950 อัตราการเคลื่อนย้ายของ คูกน้ำ
เพียง 3.1 เมตร ต่อปี

2. อัตราการเคลื่อนย้ายร่องน้ำ (Rate of channel movement)
โดยทั่วไปลดต่ำลงเมื่อร่องน้ำมีความยาวสูงสุด และความลาดชันร่องน้ำ ความเร็ว
น้ำไหลรวมทั้งการพังทลายลดลง

3. การสั้นเข้าของลำน้ำแบบคดเคี้ยวด้วยการไหลตัดผ่านร่องน้ำ ทำให้เพิ่มความลาดชันและเกิดคูก้นน้ำอันใหม่ เพื่อปรับระดับร่องน้ำเข้าสู่สภาวะ สมดุลย์ การขยายตัวของคูก้นน้ำที่เกิดใหม่นี้จะช้าลงเรื่อย ๆ เมื่อร่องน้ำใกล้ถึง จุดสมดุลย์โดยประมาณ ซึ่งแทนด้วยขอบเขตคูก้นน้ำ (Handy, 1972 : 475 - 480)

แลงเบย์น (Langbein) และ ลีโอโพลด์ (Leopold) ได้ศึกษา องค์ประกอบที่ทำให้แม่น้ำคดเคี้ยวแปรปรวนน้อยที่สุด ด้วยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางเรขาคณิตคูก้นน้ำ (Planimetric geometry) กับการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบลักษณะลำน้ำ (hydraulic factors) ในส่วนลำน้ำที่เป็นคูก้นน้ำ กับส่วนลำน้ำที่ไหลตรง ๆ ผลปรากฏว่า

1. ความคดโค้งของแม่น้ำพิจารณาได้จากภาพตัดตามยาว (Longitudinal profile) ของระบบลำน้ำและการเคลื่อนย้ายคันข้างของ ร่องน้ำ

2. การปรับสภาพไปสู่ลำน้ำคดเคี้ยวไม่ใช่เพราะการพังทะลาย และการทับถมเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงลักษณะท้องทราย (bed form) ตามแรงต้านทานการเคลื่อนไหลของน้ำ (hydraulic resistances) และลักษณะ สมรรถฐานท้องดินที่จะพัดพาตะกอนก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการปรับสภาพลำน้ำ

3. ความลึก ความเร็ว และความลาดชัน ที่ปรับสภาพตามการเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดสี (shear friction) มีค่าลดต่ำลงตามส่วนของร่องน้ำ คดโค้งมากกว่าส่วนของร่องน้ำตรง ๆ

4. อัตราส่วนช่วงยาวคูก้นน้ำต่อรัศมีมีความโค้งของคูก้นน้ำ = 4.7 (Langbein, 1966 : H15)

ลีโอโพลด์ และวอลแมน (Leopold & Walman) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบ โครงสร้างร่องน้ำ เพื่อค้นหาลักษณะสัณฐานธรรมชาติที่สำคัญของลำน้ำแบบคดเคี้ยว

และรูปแบบคูกน้ำ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างมิติโครงสร้างคูกน้ำกับลักษณะลำน้ำ จากแผนที่ภูมิประเทศและแผนที่โคะ พบว่า ช่วงยาวคูกน้ำ ความกว้างร่องน้ำ และรัศมีคูกน้ำเป็นมิติที่กำหนดคูกน้ำหรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่ง ขนาดหัวโค้งคูกน้ำได้ สัดส่วนตามขนาดของแม่น้ำ แม่น้ำขนาดใหญ่หัวโค้งคูกน้ำจะใหญ่ แม่น้ำสายเล็ก หัวโค้งจะเล็กด้วย ช่วงยาวคูกน้ำจะเป็น 7 ถึง 10 เท่าของความกว้างร่องน้ำ แต่ความสัมพันธ์ช่วงกว้างคูกน้ำกับความกว้างร่องน้ำต่ำมาก ทั้งนี้อาจหมายความว่า ช่วงกว้างคูกน้ำถูกควบคุมด้วยลักษณะการพังทลายของฝั่งน้ำ และองค์ประกอบอื่นๆ ตามท้องถิ่นมากกว่าแรงน้ำไหล ลีโอโพลด์ ได้สรุปรูปแบบคูกน้ำไว้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงยาวคูกน้ำ (L_m) กับความกว้างร่องน้ำ (W) ได้

$L_m = 10.9 W^{1.01}$ ความกว้างคูกน้ำ (Meander amplitude, A) กับ ความกว้างร่องน้ำ ได้ $A = 2.7 W$ และความยาวคูกน้ำต่อรัศมีความ โค้ง (R_m) ได้ $L_m = 4.7 R_m^{0.98}$ แต่ลักษณะความสัมพันธ์แบบ เส้นตรงจะได้ $L_m = 4.5 R_m$ ถ้านิอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อความกว้าง ร่องน้ำ ได้ $R_m/W = \frac{10.9}{4.7} = 2.3$ การก่อตัวกัดเซาะร่องน้ำ (cut off)

จะจำกัดขนาดความกว้างคูกน้ำ และยังขึ้นอยู่กับการแจกกระจายของแรง เสียดสี (Shear against) ปะทะตามฝั่งลำน้ำด้วย นอกจากนี้ยังอยู่ที่ลักษณะที่ราบดินตะกอนน้ำท่วมถึง และการเคลื่อนย้ายของตะกอนอีกด้วย ฉะนั้นอัตราการ เคลื่อนย้ายของลำน้ำตอนล่าง (downstream) จะสัมพันธ์กับอัตราการขยายตัว ความกว้างคูกน้ำ วอลแมน และลีโอโพลด์ ยังให้เหตุผลอีกว่า สาเหตุที่ทำให้ ลำน้ำคูกน้ำที่ได้จากการศึกษาเบียงเบนมี 2 ประการ คือ การเปลี่ยนแปลงรูป ลักษณะคูกน้ำที่ไม่คงที่ไปสู่สภาพลักษณะคงที่ (stable form) ประกอบกับการสะสม ตะกอนและเพราะการแปรผันของปริมาณน้ำไหลด้วย อีกประการหนึ่งคือ ความ ไม่เหมือนกันของโครงสร้างหิน ลักษณะดินริมฝั่งและปริมาณตะกอนทับถม รวมทั้ง ต้นไม้ที่ปกคลุมไม่สม่ำเสมอ (nonhomogenetic) (Leopold & Walman, 1960 : 769 - 794)

ผลของการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะลำน้ำแบบต่าง ๆ หลายสายในสหรัฐอเมริกา พบว่า ช่วงกว้างคูกน้ำและช่วงยาวคูกน้ำจะสัมพันธ์เป็นพิเศษกับปริมาณน้ำไหลออกและชนิดของตะกอน แต่แม่น้ำทุกสายไม่ปรับตัวเป็นลำน้ำคดเคี้ยวเสมอไป บางสายปรับตัวเป็นลำน้ำแบบเกลียวเชือก (Braided stream) ลำน้ำแบบคดเคี้ยว (Meander stream) จะลดความลาดชันร่องน้ำให้ต่ำลงด้วยการเพิ่มความยาวของลำน้ำ แต่การทับถมของตะกอนเป็นเกาะแก่งในลำน้ำแบบเกลียวเชือก จะเพิ่มความลาดชันเล็กน้อย นั่นคือ ลำน้ำแบบคดเคี้ยวมีความลาดชันต่ำกว่าลำน้ำแบบเกลียวเชือก และปริมาณน้ำไหลออกก็น้อยกว่าด้วย (Lepp, 1973 : 157)

เมลตัน (Melton) ได้ศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างธรณีสัณฐานกับปัจจัยควบคุมรูปลักษณะสัณฐานทางเรขาคณิต ของระบบระบายน้ำโดยใช้ตัวแปรอากาศวิทยา (climatic variables) ตัวแปรคุณสมบัติผิวพื้นพิภพ (surficial variables) และตัวแปรสัณฐานภูมิประเทศ (morphometric) รวม 15 ตัวแปร ด้วยการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์คำนวณค่าแมทริกซ์ (matrices) ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. ความยาวของร่องน้ำจะคงที่ ถ้าพื้นที่รับน้ำ (Basin area) อัตราความลาดชันของน้ำไหล การกักก่อกวนพื้นเอียงและอัตราแผ่นดินเลื่อนไหลคงที่

2. ความลาดชันคานข้างของลุ่มน้ำจะคงที่ ถ้าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยและความสามารถซึมซาบไคของผิวพื้นพิภพคงที่ (Melton, 1958 : 442 - 460)

ลักษณะพื้นฐานที่สำคัญประการหนึ่งของร่องน้ำทั้งส่วนตรงและส่วนคดโค้งในลำน้ำพัฒนาเต็มที คือ สันทรายไคทองน้ำ (shoal or riffle) แอ่งร่องน้ำลึก (pool) และสันทรายปลายโค้งตามชายฝั่งโค้งนูน (Point bar)

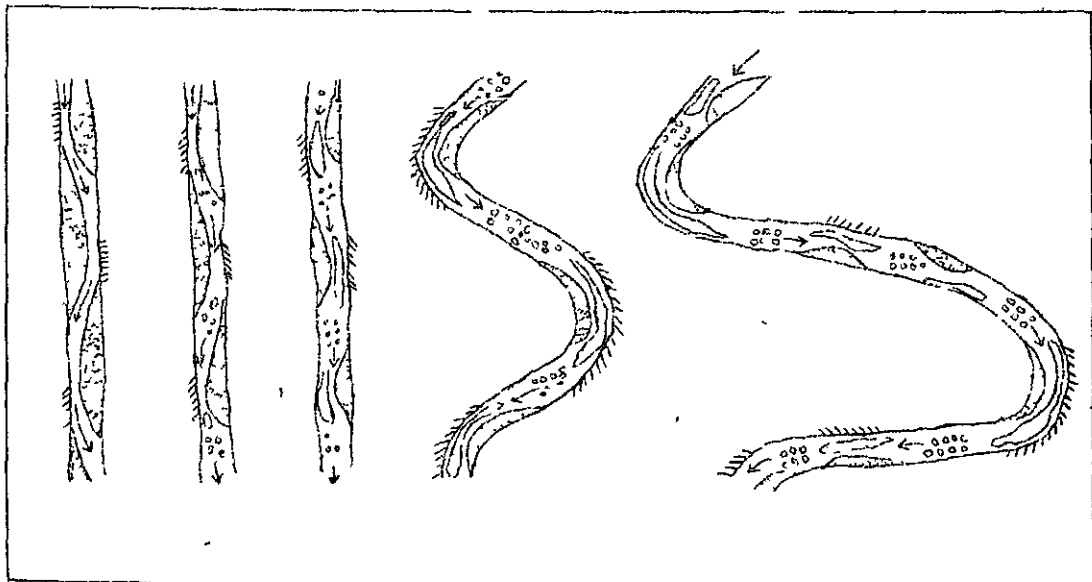
ทินค์เลอร์ (Tinkler) ได้ศึกษาลักษณะแอ่งลึกร่องน้ำ สันทราย ท้องธารกับความคเคี้ยวของลำน้ำ พบว่า ความไม่เท่ากันหรือความเฉของตะกอน สันทรายท้วงน้ำ (Asymmetric shoal or skew shoals) เป็นลักษณะ พื้นฐานเบื้องต้นของพัฒนาการร่องน้ำขึ้นตอนปลายกระษัยจักรที่ทำให้ลำน้ำคเคี้ยวจน กระทั่งตัดขาดเป็นทะเลสาบรูปแอก แอ่งลึกร่องน้ำเป็นบริเวณหลุมลึกที่ถูกครูดซุด (scour) โดยการไหลเวียนแบบก้นหอย (spiral) ขณะที่สันทรายร่องน้ำเป็น บริเวณที่บดถมของท้องธาร (Tinkler, 1972 : 1532) ลีโอโพลด์ ได้สรุป รูปแบบร่องน้ำ (Channel pattern) ไว้ว่า แอ่งลึกร่องน้ำ และสันทราย ท้องธาร เป็นลักษณะปกติของท้องธารในแม่น้ำที่ไหลผ่านดินตะกอนทับถม (Alluvial stream) จะสังเกตพบได้ทั่วไปในร่องน้ำทั้งลำน้ำส่วนตรงและส่วนที่ คเคี้ยว ขนาดพื้นที่ (spacing) ของแอ่งลึกร่องน้ำและสันทรายท้องธารมีอิทธิพล (function) ต่อความกว้างลำน้ำ อัตราการกระจายเฉลี่ยของแอ่งร่องน้ำลึก และสันทรายท้องธารที่วัดได้เป็น 5 - 7 เท่า ของความกว้างร่องน้ำ บริเวณที่ เกิดสันทรายท้องธารในลำน้ำที่ไหลตรง ๆ จะเป็นบริเวณร่วมของจุดเริ่มค้งน้ำ (inflection) ในลำน้ำคเคี้ยว และระยะทางสองเท่าระหว่างสันทรายท้องธาร ในลำน้ำตรง เปรียบได้กับช่วงยาวค้งน้ำ (Koller, 1972 : 1513)

เลนและบอร์แลนด์ (Lane & Borland) ศึกษาลักษณะท้องธาร กล่าวว่า ลักษณะรูปร่าง (Configuration) ที่สำคัญของสันทรายจะสัมพันธ์กับแนวร่องน้ำลึก ลักษณะท้องธาร และแรงเสียดทานท้องน้ำ (bed shear) ในแม่น้ำขนาดใหญ่ บริเวณจุดเริ่มค้งน้ำของลำน้ำ (Crossing or point of inflection) จะถูกซุดครูด เมื่อการไหลลดต่ำลง และจะสะสมทับถมตัว (fill) เมื่อการไหลสูง แต่แอ่ง ร่องน้ำลึกจะถูกทับถมสะสมด้วยตะกอนขณะที่อัตราการไหลของน้ำต่ำและถูกซุดครูด (Scour) เมื่ออัตราการไหลสูง การไหลเสียดทานปะทะจะรุนแรงตรงที่บริเวณ

ชุดครุมากกว่าบริเวณหัตถมสะสมตัว ทั้งนี้อยู่ที่ความแตกต่างของภาพตัดขวางแอ่ง
ร่องน้ำลึกและสันทรายทองธาร ในช่วงระยะอัตราการไหลของน้ำสูง บริเวณจุด
เริ่มความคดเคี้ยวหรือบริเวณสันทรายทองธาร (Crossing or riffle) มีพื้นที่
ภาพตัดขวางใหญ่กว่าบริเวณแอ่งร่องน้ำลึก แต่เล็กกว่าในช่วงระยะการไหลต่ำลง
(low stage) ลอร์เซน และทัช (Laurson & Toch) ชี้ให้เห็นว่า ขนาด
ความกว้างร่องน้ำบริเวณจุดเริ่มความคดเคี้ยว มักใหญ่กว่าที่บริเวณหัวโค้งคูก้นน้ำ
หรือแอ่งร่องน้ำลึก จึงเกิดการทับถมในบริเวณดังกล่าวขณะที่การกัดเซาะปรากฏ
ตรงบริเวณคูก้นน้ำแคบ ๆ ลักษณะความไม่สม่ำเสมอของทองธารลำน้ำทำให้การ
แจกกระจายความเร็วของกระแสน้ำแปรผันต้วย (Leopold & Walman, 1960:
779)

เคลเลอร์ (Keller) ได้ศึกษาพัฒนาการของลำน้ำที่ไหลผ่านที่ราบดิน
ตะกอนกับคุณลักษณะแอ่งร่องน้ำลึก และสันทรายทองธาร พบว่า การเพิ่มความยาว
ร่องน้ำ แอ่งร่องน้ำลึกจะเพิ่มควยทั้งนี้เพื่อรักษาพื้นที่ (spacing) ให้คงที่ การ
แจกกระจายของแอ่งร่องน้ำลึกและสันทรายทองธารจำนวนหนึ่งมีพื้นที่น้อยกว่า
3 - 5 เท่า ของความกว้างร่องน้ำ และอีกจำนวนหนึ่งมากกว่า 7 - 9 เท่าของ
ความกว้างร่องน้ำ การพัฒนาของลำน้ำที่ไหลผ่านดินตะกอนหัตถม พิจารณาจาก
แอ่งร่องน้ำลึกและสันทรายทองธารแบ่งได้ 5 ชั้น (รูปที่ 9) เริ่มจากชั้นที่ 1
ไม่มีแอ่งลึกร่องน้ำ หรือสันทรายทองธาร ลักษณะที่เด่นของทองธารร่องน้ำเป็นแบบ
หาดทรายใต้น้ำที่ไม่สม่ำเสมอ (asymmetrical shoal) จนกระทั่งลำน้ำคดโค้ง
พัฒนาการของแอ่งร่องน้ำลึกยาวกว่าสันทรายทองธารและมีพื้นที่เฉลี่ย 5 - 7 เท่า
ของความกว้างร่องน้ำ ขนาดของสันทรายทองธาร (shoal or riffle) จะ
กลายเป็นหาดทรายคูก้นน้ำ (Point bar) เคลเลอร์ ได้สรุปผลการศึกษาไว้ว่า

1. ลักษณะไม่เท่ากันของสันทรายท้องธาร ที่ลาดเทไปสู่ฝั่งลำน้ำ เป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาพัฒนาการลำน้ำชั้นมัธยมศึกษา ที่ไหลผ่านที่ราบน้ำท่วม
2. แอ่งลึกร่องน้ำ ตะกอนสันทรายท้องธารและหาดทรายคูกน้ำ (Point bar) เป็นลักษณะธรรมชาติของร่องน้ำที่ปรากฏในลำน้ำทั้งส่วนตรง ๆ และส่วนคดโค้ง
3. ค่าเฉลี่ยของพื้นที่แอ่งลึกร่องน้ำและสันทรายท้องธาร ในร่องน้ำ ที่ไหลตรง ๆ และร่องน้ำคดโค้ง ไม่ได้อยู่ที่รูปแบบของร่องน้ำ
4. จำนวนความถี่และการกำเนิดแอ่งลึกร่องน้ำ กับสันทรายท้องธาร ขึ้นอยู่กับตัวแปรของร่องน้ำนั้นอย่างมีนัยสำคัญ
5. การเคลื่อนย้ายก้นข้างของคูกน้ำและการตัดทะลุร่องน้ำเป็น ขบวนการนำไปสู่ลำน้ำแบบกตเคี้ยว ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามการผันแปรของพลังที่กระทำ ต่อร่องน้ำ (Keller, 1972 : 1531 - 1536)



ภาพที่ 9 แสดงการ ขยายแอ่งลึกร ่องน้ำและสันทรายท้องธารกับ พัฒนาการความกตเคี้ยวของลำน้ำ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้ แบ่งวิธีดำเนินการศึกษาออกเป็น 4 ตอนด้วยกัน
กล่าวคือ

1. แหล่งข้อมูลและเครื่องมือ
2. การเก็บรวบรวมข้อมูล
3. การจัดกระทำและวิเคราะห์ข้อมูล
4. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. แหล่งข้อมูลและเครื่องมือ

1.1 แผนที่ L 7017 มาตราส่วน 1 : 50,000 หมายเลขระวาง
5640 I, 5640 IV, 5641 I, 5641 II, 5641 III, 5641 IV, 5642 III
5740 IV, 5741 III, 5741 IV รวม 10 ระวาง

1.2 แผนที่ Series 1501 S มาตราส่วน 1 : 250,000 ระวาง
ND 47 - 4, ND 48 - 1, ND 48 - 2, NE 47 - 12, NE 47 - 16
NE 48 - 9, 48 - 10, NE 48 - 13 และ NE 48 - 14 รวม
9 ระวาง

1.3 แผนที่ดิน ชุดแผนที่ดินจังหวัด ฉบับที่ 9, 13 มาตราส่วน
1 : 100,000 กองการสำรวจที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน

1.4 เครื่องมือวัดระยะทางในแผนที่ (Map Measure)

1.5 เครื่องมือวัดพื้นที่ (Planimeter)

1.6 ข้อมูลวิเคราะห์องค์ประกอบและชนิดของดิน จากกองการสำรวจ
ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน

1.7 ข้อมูลทางสถิติ ระดับน้ำ ปริมาณน้ำไหลออก ความเร็วของ กระแสน้ำ และปริมาณตะกอนน้ำพาจากกองอุทกวิทยา กรมชลประทาน

1.8 ตำรา เอกสารงานวิจัยและวารสารต่าง ๆ

2. การเก็บรวบรวมข้อมูล

2.1 รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับรายชื่อและจำนวนทะเลสาบรูปแอก แล้วแบ่งสันปันน้ำระหว่างลุ่มน้ำชีกับลุ่มน้ำตอเนื่อง เพื่อหาขอบเขตบริเวณที่ศึกษาจาก แผนที่ L.7017 ทั้ง 10 ระวัง

2.2 ศึกษาและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ โดยการวัดและ กำหนดหาโครงสร้างทางเรขาคณิตของลักษณะธรณีสัณฐานในบริเวณที่ศึกษาจากแผนที่ ชุดเดิม ลักษณะโครงสร้างที่ต้องวัดและคำนวณมีดังนี้

1. ความลาดชันด้านข้าง วัดความลาดชันด้านข้างของ ทะเลสาบรูปแอกแต่ละแห่งโดยใช้สูตร

$$\text{ความลาดชันด้านข้าง } (\theta) = \frac{V}{H} \quad \text{เมื่อ}$$

V = ความสูงต่างระหว่างที่ตั้งของทะเลสาบรูปแอกกับ สันปันน้ำที่อยู่ฝั่งเดียวกัน ทรงแนวตัดตามขวางตั้งฉาก กับทะเลสาบนั้น

H = ระยะทางราบระหว่างจุดหาความสูงต่างตาม V

2. วัดและคำนวณมิติโครงสร้างคูกน้ำ ของลำน้ำแต่ละช่วง ทั้งลำน้ำตอนบนและลำน้ำตอนล่าง คานละ 3 คูกน้ำ โดยใช้ที่ตั้งของทะเลสาบรูปแอก แต่ละแห่งเป็นจุดศูนย์กลาง แล้วหาค่าเฉลี่ย มิติคูกน้ำที่ต้องวัดและคำนวณคือ

1. ความคคเคี้ยวสำน้ำ
2. รัศมีความโค้งของคูกน้ำ
3. ช่วงยาวคูกน้ำ
4. ขอบเขตคูกน้ำ

3. ความต่างระดับของทะเลสาบรูปแอก คำนวณหาความต่างระดับระหว่างความสูงต่ำของทะเลสาบรูปแอกกับความสูงค่าเฉลี่ยของสันปันน้ำที่คั่นตามขวางผ่านยอดโค้งทะเลสาบรูปแอกแต่ละแห่ง

4. ความกว้างลุ่มน้ำ วัดระยะทางระหว่างสันปันน้ำที่คั่นตามขวางผ่านยอดโค้งของทะเลสาบรูปแอกแต่ละแห่ง

5. มุมของร่องน้ำโค้ง วัดมุมระหว่างเส้นแกนกลางขอบเขตค้ำน้ำกับแนวโค้งร่องน้ำ ไปทางลำน้ำตอนล่างและลำน้ำตอนบนของทะเลสาบรูปแอกแต่ละแห่ง คำนวณ 3 กิ่งน้ำแล้วหาค่าเฉลี่ยของมุม

6. ระยะทางของทะเลสาบรูปแอก วัดความยาวทางราบระหว่างยอดโค้งของทะเลสาบแต่ละแห่ง ไปยังเส้นแกนกลางลุ่มน้ำ

7. ช่วงระยะของทะเลสาบรูปแอก วัดและคำนวณหาช่วงระยะทะเลสาบแต่ละแห่ง ได้โดยหาอัตราส่วนของระยะทางตามลำน้ำระหว่างปลายบน ไปยังอีกปลายบนของทะเลสาบรูปแอกที่อยู่ถัดไปตามลำน้ำตอนล่าง ต่อระยะทางตรงจากยอดโค้งทะเลสาบไปยังร่องน้ำที่ใกล้ที่สุด

8. ความลาดชันระหว่างทะเลสาบ หาได้โดยใช้สูตร

$$\theta = \frac{V}{H} \quad \text{เมื่อ}$$

$$V = \text{ความต่างระดับระหว่างทะเลสาบที่ใกล้กันที่สุดตามทิศทางการไหลของน้ำ}$$

$$H = \text{ระยะทางรวมระหว่างยอดโค้งทะเลสาบที่หาความต่างระดับ}$$

2.3 เก็บข้อมูลชนิดของดิน ตามที่ตั้งทะเลสาบรูปแอกแต่ละแห่ง จากชุดแผนที่ดินจังหวัด ฉบับที่ 9, 13 ของกองสำรวจดิน แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เนื้อดินองค์ประกอบของดินชนิด (silt)

2.4 การสำรวจ ผู้วิจัยได้ออกสำรวจภาคสนามบริเวณลุ่มน้ำชีบางตอนเพื่อสังเกตสภาพลักษณะภูมิประเทศทั่วไป ลักษณะโครงสร้างของร่องน้ำ ทะเลสาบรูปแอก ใน

พืชพรรณ ทั้งในช่วงน้ำหลากและน้ำลด ในระหว่างเดือนตุลาคม พฤศจิกายน ธันวาคม 2519 และมกราคม 2520 รวม 4 ครั้ง

2.5 รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับวัฏจักรของการพัฒนาลักษณะภูมิประเทศ จากแผนที่จุด 1501 S ทั้ง 9 ระบาย ดังนี้

1. วัฏพื้นที่แอ่งระบายน้ำทั้งหมด (total drainage basin area) ในบริเวณลุ่มน้ำชี แทนด้วย Area A.
2. วัฏพื้นที่ระหว่างเส้นชั้นความสูงทุก ๆ ช่วง โดยเริ่มจากสันปันน้ำหรือขอบเขตพื้นที่รับน้ำ (divide or perimeter) กับเส้นชั้นความสูง (contour) ที่ต้องการหาพื้นที่แต่ละช่วงลดต่ำลงตามลำดับ จนถึงปากแม่น้ำ (mouth) ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของลุ่มน้ำชี พื้นที่แต่ละช่วงแทนด้วย Area a
3. คำนวณหาอัตราส่วนของพื้นที่ (Ratio of area) ระหว่างพื้นที่ A กับพื้นที่ a โดยใช้สูตร

$$X = \frac{a}{A}$$

4. หากความสูงทั้งหมดของแอ่งระบายน้ำ (total height of basin) โดยวัดความต่างระดับระหว่างจุดสูงสุด (summit plane) กับจุดต่ำสุด (base plane) เพื่อหาความสูงท้องถิ่น (Local relief) หรือความต่างระดับ (Height different) ของลุ่มน้ำชี แทนด้วย H
5. หาช่วงความสูงต่างระหว่างเส้นชั้นความสูงที่ต้องการทราบแต่ละช่วงกับเส้นฐานต่ำสุด (base plane) ของลุ่มน้ำ โดยเริ่มจากจุดสูงสุด (summit) เรื่อยลงไปตามลำดับ การวิจัยนี้ใช้เส้นชั้นความสูงทุกช่วง 100 เมตร ค่าที่ได้แทนด้วย h

6. คำนวณหาอัตราส่วนของความสูง (Ratio of height) ระหว่าง h กับ H โดยใช้สูตร

$$y = \frac{h}{H}$$

3. การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ตรวจสอบ จำแนกและรวบรวมข้อมูลเป็นหมวดหมู่ตามลำดับที่ของการศึกษา

3.2 ทำการวิเคราะห์วัฏจักรของการพัฒนาลักษณะภูมิประเทศในลุ่มน้ำชีและบริเวณที่เกิดทะเลสาบรูปแอก เพื่อทราบขั้นตอน (stage) ของการพังทลายทางธรณีสัณฐาน ซึ่งเป็นการตรวจสอบสมมุติฐานการวิจัยข้อ 1 มีวิธีดำเนินการคือ นำข้อมูลที่รวบรวมได้จาก 2.53 และ 2.56 มาวิเคราะห์ฮิโสมเมตริก (Hypsometric Analysis) ตามวิธีการของ สตราเลอร์ (Strahler) ด้วยการสร้างเส้นโค้งฮิโสมเมตริก (hypsometric curve) แล้วคำนวณหา hypsometric integrate เพื่อหาพื้นที่ใต้เส้นโค้งสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่และความสูง (area-altitude curve) ซึ่งจะทำให้ทราบปริมาณเปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวพิภพที่ถูกกัดกร่อนชะล้างพังทลาย โดยกระบวนการลดระดับ (denudational processes)

3.3 นำข้อมูลที่รวบรวมได้จากข้อ 2.2 และ 2.3 มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis) ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อหาองค์ประกอบร่วม (common factor) ของมิติทางธรณีสัณฐานที่ศึกษาทั้ง 12 มิติ ซึ่งเป็นการตรวจสอบสมมุติฐานการวิจัยข้อ 2 และวิเคราะห์องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก ตามสมมุติฐานการวิจัยข้อ 3 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบ Principal factor solution เพื่อสร้างตารางองค์ประกอบ (Factor matrix) แทนตารางสหสัมพันธ์ภายใน (Correlation matrix) แล้วทำการหมุนแกนแบบ Varimax Rotated ตามวิธีของไกเซอร์ (Kaiser) โดยถือหลักการหมุนให้แกนทั้งสองขององค์ประกอบตั้งฉากกัน (Orthogonal Rotation) เพื่อแปลความหมาย มีวิธีดำเนินการดังนี้

1. หาดตารางสหสัมพันธ์ (Correlation Matrix) โดยวิธี Pearson Product moment ของเพียร์สัน (Pearson)

2. หาทารางองค์ประกอบ (Factor Matrix) ด้วยการ
สกัดองค์ประกอบ (Factor Extraction) แบบ Principal factor solution
ของ Hotelling

3. ทำการหมุนแกนองค์ประกอบ (Factor rotation)
แบบ orthogonal rotation ตามวิธี Varimax method ของไคเซอร์
(Kaiser)

3.4 นำข้อมูลที่รวบรวมได้จาก 2.2 และ 2.4 ไปคำนวณหา
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple correlation coefficient) และ
สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) แบบ Stepwise
multiple regression ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างสมการถดถอย
สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple regression equation) ในรูปคะแนนดิบ เพื่อ
พยากรณ์ลักษณะทางธรณีสัณฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแอก

4. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 สหสัมพันธ์พหุคูณ โดยวิธี Stepwise multiple regression
by Doolittle Method)

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis) โดยวิธี
Principal Factor และทำการหมุนแกนแบบ Varimax Rotated ตามวิธี
ของไคเซอร์ (Kaiser) (Harman, 1968 : 136)

โครงสร้างทางธรณีวิทยาและธรณีสัณฐานบริเวณลุ่มน้ำชี

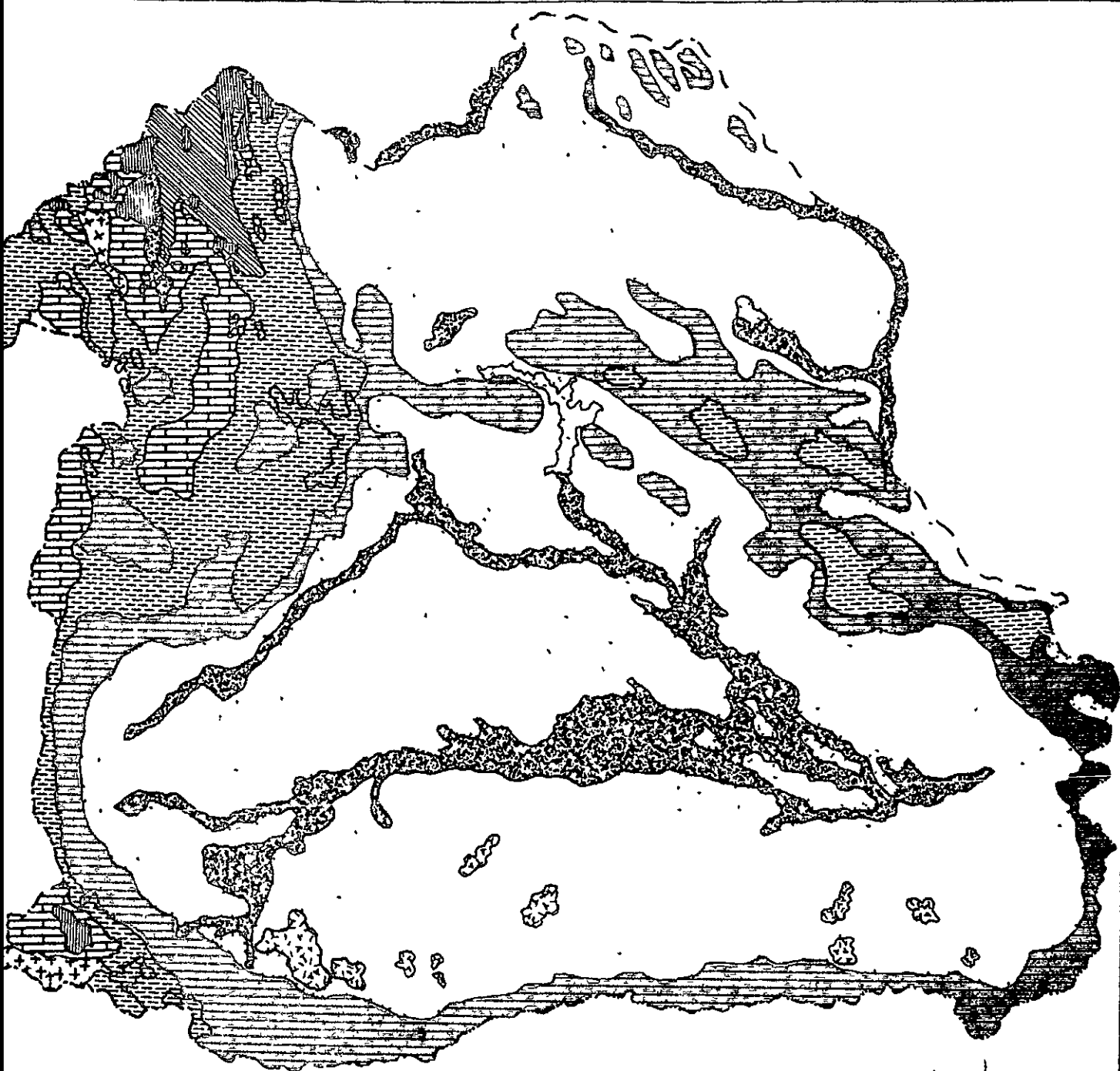
ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาลุ่มน้ำชี

บริเวณลุ่มน้ำชีส่วนใหญ่ประกอบด้วยแอ่งแบบก้นกะทะหงาย (syncline) ที่เอียงลาดไปทางตะวันออก มีแกนกลางแนวทิศตะวันออกเฉียงใต้เป็นส่วนหนึ่งของแอ่งโคราช (Khorat basin) บริเวณทางตะวันตกที่เป็นต้นกำเนิดลุ่มน้ำตอนต้น มีความซับซ้อนเพราะเป็นส่วนหนึ่งของแนวโค้งตัวอินโดจีนเนียน (Indosinian fold belt) หรือเป็นส่วนหนึ่งของแนวโค้งกะทะคว่ำใหญ่ (Anticlinorium) แม่น้ำชีและลำน้ำสาขาตอนต้นน้ำจึงไหลผ่านดินที่มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกันหลายชุด ซึ่งจะมีผลต่อพัฒนาการของลักษณะลำน้ำและการสึกกร่อนพังทลายของภูมิประเทศ

จากแผนที่ธรณีวิทยาและผลงานการสำรวจธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ บริเวณลำชีบนต้นน้ำไหลผ่านภูเขายอทธิ ภูเขาดูนางที่เป็นทิวเขาหินชุดเพอร์เมียน (Permian) หรือหินปูนชุกราชบุรี (Ratchaburi Formation) ลำน้ำจึงไหลผ่านหินชุดภูพานและพระวิหาร (Phu Phan and Phra Wihan Formation) เป็นชั้นหินชุดโคราชที่มีความแข็งแกร่งมาก ต่อจากนั้นจึงจะไหลผ่านแอ่งกะทะหงายของหินชุดภูกระดึงที่ง่ายต่อการสึกกร่อน แล้วลำน้ำจะไหลกักเขาะตัดผ่านทิวเขาหินชุดภูพานและพระวิหารอีกชั้นหนึ่ง ก่อนที่จะไหลบนหินชุดโคกกรวด (Khok Kruat Formation) และหินเกลือหรือหินซุคมหาสารคาม (Rock Salt or Mahasarakham Formation) ส่วนบริเวณลำน้ำพรม น้ำเชิญ น้ำพอง และลำพะเนียงเป็นลุ่มน้ำสาขาที่สำคัญ ไหลผ่านหน่วยดินที่สลับซับซ้อน (complex) ของหน่วยหินปูนและหินปูนสลับหินทราย หินดินดาน ที่เชื่อว่าเดิมเป็นบริเวณแอ่งน้ำลึก

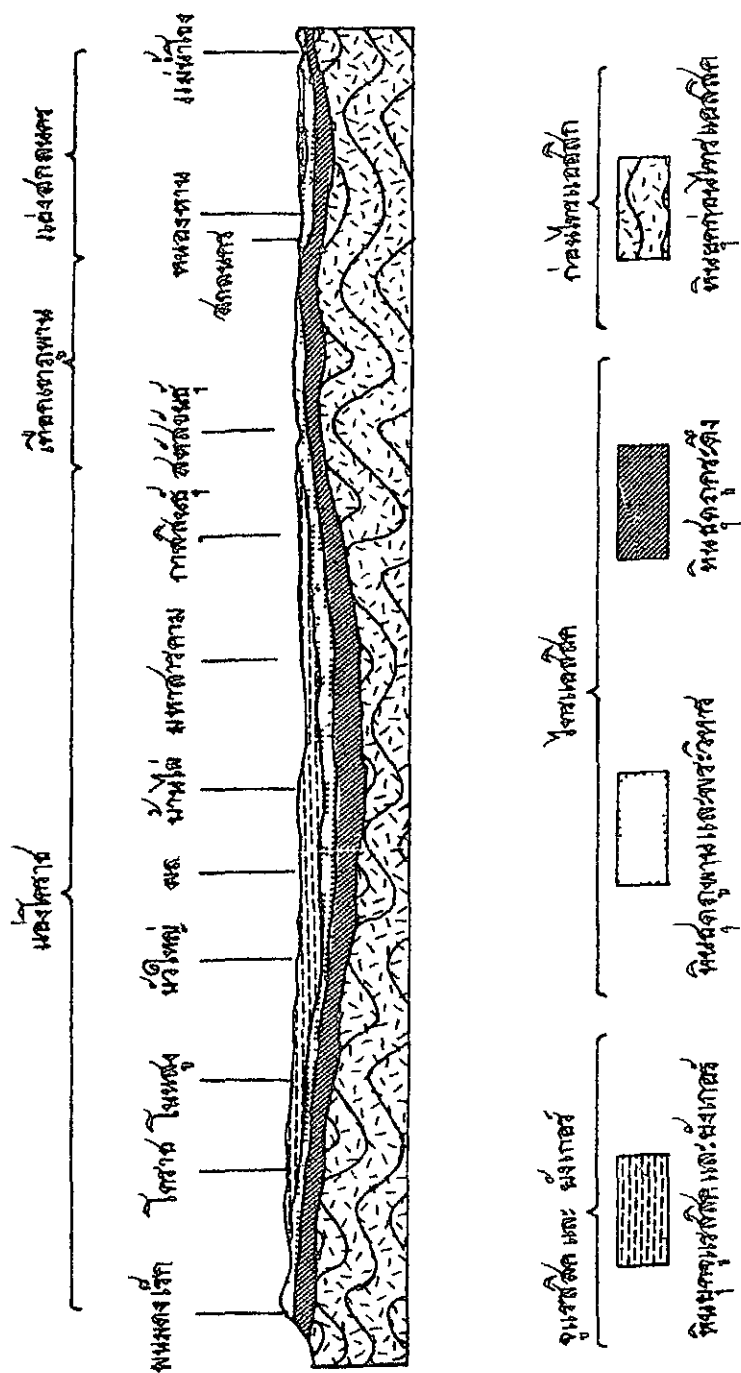
แล้วเกิดการยกตัวหลังยุคเพอร์เมียน มีทั้งแนวโค้งตัว (folding) และหักตัว (faulting) มากมาย แต่ส่วนมากลำน้ำจะไหลผ่านหินชุดภูกระดึงที่ลักษณะเป็นแอ่งกะทะหงาย โดยเฉพาะลำน้ำพรม ต้นน้ำจากเทือกเขาหินปูนราชบุรี เทือกเดียวกันกับลาชัน จะไหลผ่านหินชุดห้วยหินลาด หินชุดน้ำพองและหินชุดภูกระดึง (Phu Kradung Formation) บรรจบกับลำน้ำเชิญและลำน้ำพองซึ่งต่างก็ไหลผ่านหินชุดภูพาน หินชุดพระวิหาร และหินชุดเพอร์เมียน หรือหินปราชบุรี ส่วนลำพะเนียงต้นน้ำไหลผ่านหินชุดแก่งกระจาน (Kaeng Krachan Formation) แล้วผ่านแอ่งของหินชุดภูกระดึงจนบรรจบลำน้ำพอง ต่อจากนั้นลำน้ำพองจะหักเข้เข้าตัดผ่านหินชุดภูพานและพระวิหาร ที่เป็นแนวโค้งตัวเดียวกันกับที่ลำชีบนไหลตัดผ่านแล้วไหลผ่านหินชุดโคกกรวดและหินชุดมหาสารคามจนถึงแม่น้ำชี ลำน้ำสาขาที่สำคัญอีกคือ ลำน้ำปาวและน้ำยังตอนต้นน้ำไหลผ่านหินชุดภูพานและพระวิหารที่เป็นต้นกำเนิดลำน้ำ แล้วไหลผ่านหินชุดโคกกรวดและหินชุดมหาสารคาม

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า แม่น้ำชีและลำน้ำสาขาไหลหักเข้เข้าหินทรายชุดโคราชเป็นส่วนใหญ่ มีอยู่เพียงบางตอนของลำน้ำเชิญและลำน้ำพองเท่านั้นที่ไหลผ่านหินชุดเพอร์เมียน ในตอนต้นของแม่น้ำชีและสาขาจะไหลตามชั้นหินชุดภูกระดึง ซึ่งง่ายต่อการหักเข้เข้าลึกกร่อน เนื่องจากเป็นชุดหินไม่แข็งแรง (nonresistance) เพราะประกอบด้วยหินซิลต์ (siltstone) และหินดินดาน (shale) จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นแอ่งลุ่มต่ำ แต่เมื่อพิจารณาตลอดทั้งลุ่มน้ำชีจะพบว่า ส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำไหลผ่านหินชุดโคกกรวดหินชุดมหาสารคามและหินชุดซีโนโซอิก (Cenozoic) โดยทั่วไปถูกปกคลุมด้วยการทับถมของตะกอนเป็นหินชุดที่ไม่มี ความแข็งแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะนุ่มเท (dup) ของหินเหล่านี้น้อยมากจนเกือบเป็นแนวราบ ทำให้มีผลต่อการกัดกร่อนพังทะลายของผิวพื้นผิว และพัฒนาการแปรเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างทางธรณีสัณฐานของลุ่มน้ำชี (แผนที่ธรณีวิทยา, 1972 : 4)



- | | | | | | |
|--|------------------------|--|--------------------|--|---------|
| | ดินตะกอน | | หินชุดภูกระดึง | | หินปะปน |
| | หินก่อกำเนิดหินอัคนี | | หินชุดเขาชะเมา | | หินแปร |
| | หินชุดภูพานและพรมวิหาร | | หินชุดแม่จางกระซาง | | พดร์ไฟ |

ภาพที่ 10 แผนที่โครงสร้างทางธรณีวิทยาของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



ภาพที่ 11 แสดงภาพตัดขวางใต้ของตัวพิมพ์บนกระดาษที่พิมพ์ด้วย

ลักษณะและชนิดของดินในลุ่มน้ำชี

เนื่องจาก หินพื้นฐานของลุ่มน้ำชีส่วนใหญ่เป็นหินทราย หินชิลต์และหิน
กินคาน ซึ่งมีหินกรวดมน หินเกล็ดและยิบซัมปะปนบ้าง ดังนั้นคุณลักษณะดินใน
ลุ่มน้ำชีจึง เป็นไปตามวัตถุดิบกำเนิด (parent materials)

แม่น้ำชีและสาขาทั้งหลายไหลก่อกำเนิด บริเวณลุ่มน้ำชีจึงเป็นบริเวณที่เกิด
การกัดกร่อนโดยลำน้ำ กัดเซาะหินพื้นฐานเกิดเป็นร่องน้ำในสมัยหนึ่ง แล้วนำเอา
วัตถุตะกอนน้ำพาที่เกิดขึ้นใหม่ ๆ อยู่เสมอมาทับถมอีกสมัยหนึ่งสลับกัน ตั้งแต่ยุค
ควอเตอร์นารี (Quaternary) จนถึงสมัยรีเซนต์ (Recent) พื้นที่ที่ปรากฏใน
ปัจจุบันนี้ ผ่านการพังทลาย การทับถมและการสลายตัวมาแล้วมากกว่าหนึ่งครั้ง
แปรต่าง ๆ ที่สลายน้ำได้และสลายตัวได้ง่ายเกือบจะไม่มีเหลืออยู่เลยเพราะถูกน้ำชะ
ไปหมด ทั้งไว้แต่วัตถุที่ขาดความอุดมสมบูรณ์ ดินต่าง ๆ ที่พบในบริเวณนี้ส่วนใหญ่
กำเนิดมาจากตะกอนวัตถุที่ลำน้ำพัดพาพาทับถมกันมานานแล้ว ที่เรียกว่าดินตะกอนเก่า
(Old alluvium) ส่วนดินที่เกิดจากการสลายตัวของหินพื้นฐานโดยตรงนั้นมีน้อย
มาก ส่วนใหญ่มักเกิดจากหินที่เลื่อนไหลมาจากที่สูงและมาทับถมบริเวณเชิงเขา
ก่อนที่จะสลายตัวมาเป็นดินในที่ลุ่ม

จากแผนที่ดินและรายงานการสำรวจดินบริเวณลุ่มน้ำชี ของกรมพัฒนาที่ดิน
ได้จำแนกดินที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยอาศัยความลึกของดิน เนื้อดิน สีของดิน
ปฏิกิริยาของดิน การจัดเรียงชั้นและวัตถุดิบกำเนิดของดินที่เหมือนกันไว้ด้วยกัน
ผลการสำรวจพบว่า บริเวณลุ่มน้ำชีมีชุดของดินหลายชุด โดยเฉพาะบริเวณจังหวัด
มหาสารคาม กาฬสินธุ์ และร้อยเอ็ด ประมาณ 90% ดินมีเนื้อดินเป็นทราย
เรียกว่าดินร่วนปนทรายตอนบน เช่น ดินชุดโคราช (Kt: Khorat series) ดิน
ชุดร้อยเอ็ด (Rt: Roi-Et) ดินชุดยโสธร (Yt: Yasothorn series) ดินชุด
โพนพิสัย (PP: Phon Pisai) และเป็นทรายจัดคือดินชุดน้ำพอง (Ng: Nam
Pong) และดินอุบล (Ub: Ubon series) ดินเหล่านี้มีอินทรีย์วัตถุต่ำมาก

การเกาะตัวของดินก็จับกันอย่างหลวม ๆ เมื่อฝนตกทำให้น้ำพัดพาหน้าดินไปได้ง่าย อัตราการชะล้างพังทลายจึงสูง มีประมาณ 8% เท่านั้น ที่เนื้อดินเป็นดินเหนียวหรือ ดินร่วนเหนียว ที่เหลือออกนั้นเป็นบริเวณภูเขา หนอง บึง ตามธรรมชาติและอ่างเก็บน้ำชลประทาน ดินพวกนี้มักอยู่ในที่ลุ่มต่ำน้ำท่วมเสมอ เช่น ดินชุดชัยนาท

(Cn: Chai nat series) ดินชุดราชบุรี (Rb: Ratchaburi) ดินศรีสงคราม (Ss: Si Songkham) ดินพิมาย (Pm: Phimai) ซึ่งมักมีปัญหาการไถพรวน

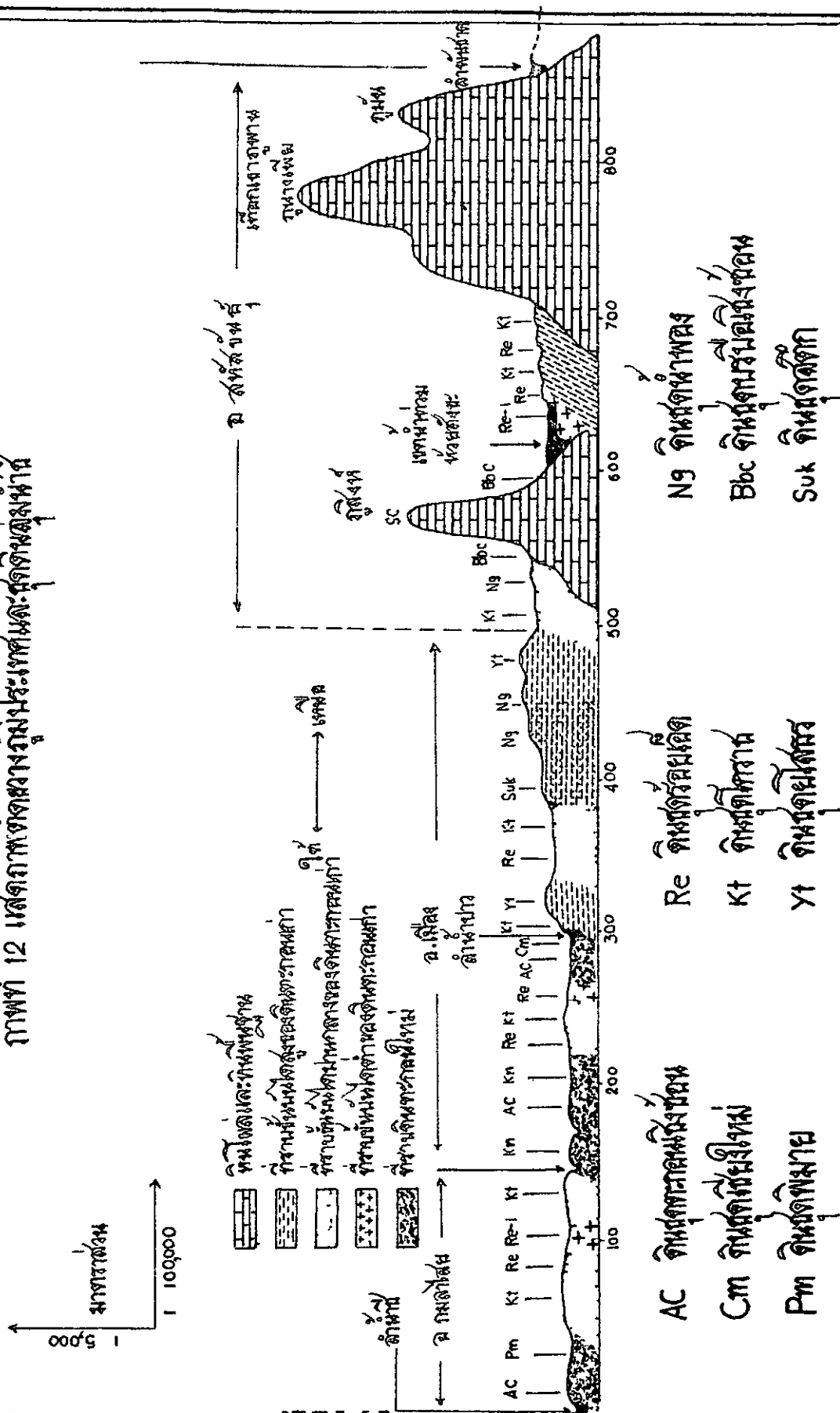
โดยเฉพาะจังหวัดมหาสารคามมีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 5,754 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 3,596,140 ไร่ ดินที่พบทั้งหมดเข้าใจว่าเกิดจากตะกอนของลำน้ำพัดพามาทับถมกันทั้งสิ้น ดินตะกอนลำนํ้าที่เกิดจากการพัดพามาทับถมกันใหม่ อยู่ตามบริเวณลำน้ำ ลำห้วยต่าง ๆ มีเนื้อที่ไม่ถึง 8% นอกนั้นเป็นดินที่เกิดจากตะกอนลำน้ำที่พัดพามาทับถมกันมานานแล้ว ดินที่พบมากที่สุดคือ ดินชุดร้อยเอ็ด มีประมาณ 1,304,040 ไร่ หรือประมาณ 36% รองลงมาคือดินชุดโคราชมีประมาณ 744,720 ไร่ หรือประมาณ 20% และดินชุดน้ำพองกับดินชุดอุบลฯ ประมาณ 15% และ 18% ตามลำดับ จะเห็นว่าดินทั้ง 4 ชุดนี้ มีเนื้อที่รวมกันคิดประมาณ 79% นอกนั้นเป็นดินชุดอื่น ๆ (รายงานการสำรวจดิน, กรมพัฒนาที่ดิน, 2518 : 70)

ดังนั้นดินบริเวณลุ่มน้ำชีเกือบทั้งหมดมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณสมบัติของดิน น้ำและเกลือในดิน สภาพพื้นที่และการชะล้างพังทลาย

ลักษณะภูมิอากาศบริเวณลุ่มน้ำชี

สภาพภูมิอากาศของบริเวณลุ่มน้ำชี ถ้าจะแบ่งลักษณะอากาศตามการแบ่งของคอปเพน (Koppen) จัดอยู่ในภูมิอากาศแบบที่เรียกว่า Tropical Savanna Climate (Aw) ซึ่งในรอบปีหนึ่งมีฤดูแล้งเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำชี

ภาพที่ 12 เสาอากาศของกรมประมงและมูลนิธิชุมชนฟ้าสูง



ส่วนใหญ่อยู่ในเขตจังหวัดชัยภูมิ ขอนแก่น มหาสารคาม กาฬสินธุ์ ร้อยเอ็ด และ ยโสธร ดังนั้นจึงได้นำสถิติอากาศประจำถิ่นของกรมอุตุนิยมวิทยา ที่วัด ณ สถานี จังหวัดร้อยเอ็ด ขอนแก่น และชัยภูมิ มาประกอบการพิจารณาสภาพภูมิอากาศของ บริเวณลุ่มน้ำชี

ฝนที่ตกในลุ่มน้ำชี เป็นผลมาจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เช่นเดียวกับ บริเวณอื่น ๆ ของประเทศ ซึ่งจะเริ่มตกในเดือนพฤษภาคมหรือบางทีปลายเมษายน มีช่วงฝนทั้งในเดือนมิถุนายนหรือกรกฎาคม และจะตกชุกมากในเดือนสิงหาคม กันยายน และตุลาคม เมื่อร่องมรสุมเลื่อนกลับไปสู่เส้นศูนย์สูตร ประกอบกับระยะนี้ มักเกิดพายุไต้ฝุ่นหรือพายุโซนร้อนขึ้น ในบริเวณทะเลจีนใต้หรือมหาสมุทรแปซิฟิก แล้วเคลื่อนตัวเข้าฝั่งฉานซึ่งมีอิทธิพลภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แม้ส่วนใหญ่จะอ่อนกำลังลงเมื่อเข้าสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แต่ก็กลายเป็นพายุดีเปรสชัน (depression) ทำให้เกิดฝนตกแผ่เป็นบริเวณกว้างขวางและตกติดต่อกันเป็น เวลานาน พายุดีเปรสชันจึงมีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำฝนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นบริเวณที่ได้รับฝนจากพายุไต้ฝุ่นหรือพายุโซนร้อน ในรูปพายุดีเปรสชันมากกว่า ภาคอื่น ทำให้มีค่าปริมาณน้ำฝนทั้งปีโดยเฉลี่ยสูงกว่าภาคกลางและภาคเหนือ ด้วย แต่ช่วงเวลาที่เกิดฝนมีจำกัด ราวปลายเดือนตุลาคมหรือต้นเดือนพฤศจิกายน เมื่อลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเริ่มพัดฝนก็หยุดตก เป็นฤดูแล้งอย่างเด่นชัด

ปริมาณน้ำฝนตกรวมทั้งปี ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเฉลี่ยจากข้อมูล ระยะ 40 - 50 ปี พบว่า มีฝนตกชุกบริเวณแม่น้ำโขงและค้อย ๆ ลดน้อยลงเมื่อ ห่างออกไปทางตะวันตกของภาค ซึ่งเป็นต้นน้ำของลุ่มน้ำชี ค่าปริมาณน้ำฝนในลุ่ม น้ำชี โดยประมาณอาจกล่าวได้ดังนี้คือ ในแนวเหนือใต้จากชุมแพ ชัยภูมิ-สีคิ้ว มีค่าในเกณฑ์ปีละ 1,100 มิลลิเมตร จากน้ำพอง ขอนแก่น อ่างเก็บน้ำโนน มีค่าในเกณฑ์ปีละ 1,200 มิลลิเมตร ในแนวภูพาน-มหาสารคาม มีค่าในเกณฑ์ ปี 1,300 มิลลิเมตร ในแนวสหัสขันธ์ เสดภูมิ ศรีสะเกษ มีค่าในเกณฑ์ปีละ

1,400 มิลลิเมตร ถัดไปแนวเหนือใต้ระหว่างศรีสะเกษ อุบลราชธานี มีค่า
1,500 มิลลิเมตร โดยเฉพาะบริเวณปากแม่น้ำมูล มีฝนตกปีละ 1,600-
1,700 มิลลิเมตร ความผันแปรรายปีของข้อมูลมีระหว่าง 35 - 45 เปอร์เซ็นต์
ทั้งในทางสูงและต่ำจากค่าเฉลี่ยดังกล่าว

จากสถิติน้ำฝนในระยะ 20 ปี (2494 - 2513) (ตาราง 1)
แสดงให้เห็นว่าปริมาณฝนตกเฉลี่ยของปีอยู่ในเกณฑ์ปานกลางทั้ง 3 จังหวัด คือ
จังหวัดร้อยเอ็ด 1,399.8 มิลลิเมตร จังหวัดขอนแก่น 1,197.8 มิลลิเมตร
และจังหวัดชัยภูมิ 1,160.2 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเฉลี่ยในระยะ
26 ปี (2494 - 2519) ก็ยังไม่แตกต่างกันมากนัก และมีแนวโน้มเหมือนกันคือ
1,350.06, 1,184.1, 1,165.92 ตามลำดับ นั่นคือฝนตกลดลงไปทาง
ตะวันตกซึ่งเป็นต้นน้ำ ฝนตกมากที่สุดในเดือนกันยายน ที่ร้อยเอ็ดมีปริมาณน้ำฝน
ในเดือนนี้ 336.3 มิลลิเมตร จังหวัดขอนแก่น 277.6 มิลลิเมตร และจังหวัด
ชัยภูมิ 293.2 มิลลิเมตร เดือนธันวาคมมีฝนตกน้อยที่สุด ที่จังหวัดร้อยเอ็ดมี
ปริมาณน้ำฝน 0.2 มิลลิเมตร จังหวัดขอนแก่น 1.5 มิลลิเมตร และจังหวัดชัยภูมิ
0.9 เมตร ส่วนสถิติอุณหภูมินั้น จะเห็นว่าในระหว่างเดือนเมษายน มีอุณหภูมิสูง
สุด วัดที่สถานีร้อยเอ็ดกับชัยภูมิได้เท่ากัน 29.7 °ซ. และขอนแก่น 30.2 °ซ.
เดือนมกราคมมีอุณหภูมิต่ำสุด ที่ร้อยเอ็ดกับขอนแก่นวัดได้เท่ากัน 23.2 °ซ. และ
วัดที่ชัยภูมิ 23.6 °ซ. พิสัยอุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั้ง 3 จังหวัด 6.5 °ซ. ซึ่งแสดงให้เห็น
ความแตกต่างไม่มากนัก (กรมอุตุนิยมวิทยา, สถิติอากาศประจำปี, 2494 -
2519)

ตาราง 1 แสดงปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิของอากาศประจำเดือน

เดือน	ชัยภูมิ		ขอนแก่น		ร้อยเอ็ด	
	ปริมาณ น้ำฝน	อุณหภูมิ	ปริมาณ น้ำฝน	อุณหภูมิ	ปริมาณ น้ำฝน	อุณหภูมิ
มกราคม	3.0	23.6	9.2	23.2	1.9	23.2
กุมภาพันธ์	12.4	25.9	19.8	25.7	11.1	25.6
มีนาคม	53.4	28.6	39.6	28.8	37.3	28.4
เมษายน	78.8	29.7	68.0	30.2	89.9	29.7
พฤษภาคม	159.7	29.4	66.0	29.8	193.2	29.5
มิถุนายน	143.1	28.4	187.6	28.6	195.1	28.7
กรกฎาคม	163.0	27.8	149.5	28.2	196.5	28.3
สิงหาคม	134.1	27.4	176.9	28.1	240.1	27.9
กันยายน	293.2	27.0	277.6	27.6	336.3	27.4
ตุลาคม	100.3	26.6	95.7	26.7	89.2	26.6
พฤศจิกายน	18.3	25.3	11.4	25.2	9.0	25.0
ธันวาคม	0.9	23.6	1.5	23.1	0.2	23.2
เฉลี่ยตลอดปี	1160.2	26.9	1197.8	27.1	1399.8	27.0

หมายเหตุ ปริมาณน้ำฝนหน่วยเป็นมิลลิเมตร

อุณหภูมิหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

ระยะสถิติ 1951 - 1970

ที่มา กองอากาศประจำถิ่น กรมอุตุนิยมวิทยา

ลักษณะโครงสร้างของแม่น้ำชี

ระบบลำน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กล่าวโดยทั่วไปได้ว่าไหลจากทิศตะวันตกไปสู่ทิศตะวันออก มีเนินเขาเตี้ย ๆ เป็นแนวกั้นแบ่งพื้นที่ออกเป็นสามส่วน คือ ตอนบนสุดเป็นเนื้อที่ประมาณ 45,000 ตารางกิโลเมตร มีลำน้ำเล็ก ๆ หลายสายเป็นสาขาไหลลงแม่น้ำโขงโดยตรง ส่วนที่เหลือตอนล่างประกอบเป็นลุ่มน้ำมูล-ชี กลุ่มเนื้อที่ประมาณ 125,200 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณสามในสี่ของเนื้อที่ทั้งภาค

ลุ่มน้ำมูล-ชี ประกอบด้วยแม่น้ำสำคัญ 2 สาย คือ แม่น้ำมูล มีเนื้อที่ลุ่มน้ำ 70,100 ตารางกิโลเมตร อยู่ทางคานใต้และแม่น้ำชี มีเนื้อที่ลุ่มน้ำ 55,100 ตารางกิโลเมตร อยู่ทางตอนบน แม่น้ำชีก็คือสาขาของแม่น้ำมูล ไหลลงบรรจบกับแม่น้ำมูล ในระหว่างเขตอำเภอมืองอุบลราชธานี กับอำเภอกันทรารมย์ จังหวัดศรีสะเกษ และแม่น้ำมูลไหลบรรจบกับแม่น้ำโขงที่อำเภอโขงเจียม ประมาณ 90 กิโลเมตร ทางตะวันออกของจังหวัดอุบลราชธานี

ลักษณะระบบลำน้ำสาขาต่าง ๆ ที่ไหลลงสู่แม่น้ำมูล-ชี มีลักษณะเหมือนกิ่งปลา คือมีแม่น้ำมูลและแม่น้ำชีเป็นโครงกระดูกกลาง แล้วมีลำห้วยเล็ก ๆ ไหลลงมาบรรจบกับแม่น้ำใหญ่เป็นลำดับกันไปทั้งฝั่งซ้ายฝั่งขวา หรือมีระบบลำน้ำแบบต้นไม้ (Dendritic pattern) นั้นเอง สาขาสำคัญที่ไหลลงสู่แม่น้ำมูล ตั้งแต่ต้นน้ำจกปลายน้ำมีดังนี้คือ บริเวณจังหวัดนครราชสีมา มีลำแคว ลำจักราช ไหลทางฝั่งขวากับลำพระเพลิง ลำตะคองและลำเชียงไกร ไหลทางฝั่งซ้าย บริเวณจังหวัดบุรีรัมย์ มีลำปลายมาศ ด้วยตาคง ไหลลงทางฝั่งขวากับลำพังงูทางฝั่งซ้าย บริเวณจังหวัดสุรินทร์ มีลำชีไหลทางฝั่งขวา บริเวณจังหวัดศรีสะเกษ มีห้วยทับทัน ห้วยสำราญ ไหลลงทางฝั่งขวากับลำพลับพลา ลำเสียว ไหลลงทางฝั่งซ้าย บริเวณจังหวัดอุบลราชธานี มีห้วยขยุง ลำโพนใหญ่ ลำโพนน้อย

ไหลลงทางฝั่งขวาที่ลำเขบก ลำเขบาย และแม่น้ำชี ไหลลงทางฝั่งซ้าย

ส่วนแม่น้ำชี ต้นน้ำเกิดจากภูเขาคอนชายเขตค่านะวันตกเฉียงเหนือของจังหวัดชัยภูมิ คือ ภูเขาศรีพระยาผอ เขายอทธิและเขาคุ่มนาง ซึ่งเป็นส่วนของเทือกเขาเพชรบูรณ์ มีสาขาสำคัญ ๆ ตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายลำน้ำดังนี้คือ บริเวณจังหวัดชัยภูมิ มีลำเขาจากสันเขาลวกไหลลงลำชีบนทางฝั่งขวา และลานางเขาจากภูเขี้ยวไหลลงทางฝั่งซ้าย ในเขตอำเภอหนองบัวแดง ใต้เขีนลงมามี ลำกระจวน ลำคันธุจากสันเขาพังเหยไหลทางฝั่งขวาที่ลำชีลงลาประทวและห้วยสามหมอกไหลลงทางฝั่งซ้าย บริเวณจังหวัดขอนแก่น มีลำเชียง น้ำพรม น้ำพวย น้ำพ่าง น้ำพองโก น้ำวังโมน และลำพะเนียง ไหลมารวมกันเป็นน้ำพอง ลงสู่แม่น้ำชีทางฝั่งซ้าย บริเวณจังหวัดมหาสารคาม มีห้วยคะคางไหลลงทางฝั่งขวา บริเวณจังหวัดร้อยเอ็ด มีลำปาวไหลลงทางฝั่งซ้าย ห้วยแอ่งไหลลงฝั่งขวา และน้ำยังไหลลงแม่น้ำชีระหว่างเขตอำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ดกับอำเภอเมืองยโสธร จังหวัดยโสธร จะเห็นได้ว่าสาขาสำคัญๆ มักไหลลงทางฝั่งซ้าย นอกจากลำน้ำสาขาที่สำคัญๆ ดังกล่าวแล้ว ยังมีลำห้วยสาขาซึ่งเป็นร่องน้ำเล็ก ๆ อีกเป็นจำนวนมาก ที่ไหลลงสู่ลำน้ำสาขานั้น ๆ และไหลลงสู่แม่น้ำชีโดยตรงทั้งฝั่งซ้ายฝั่งขวา ตลอดความยาวทั้งหมด 765 กิโลเมตร

จากแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร พบว่า ทิศทางการไหลของแม่น้ำชี เป็นไปตามการวางตัวของหินชั้นฐานที่มีมุมเท (dip) ลากไปทางตะวันออก แต่ช่วงลำชีบนจะไหลแนวตะวันออกเฉียงใต้ก่อนไปทางทิศใต้ ซึ่งขนานกับแนวการไหลของลำน้ำพอง แล้วกลับไหลวกขึ้นเกือบ 90 องศาทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือขนานกับภูผาแดง ภูผาคำ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของภูเขาศรีพระยาเข้าสู่เขตจังหวัดขอนแก่น ต่อจากนั้นแม่น้ำชีก็จะไหลวกลงทางตะวันออกเฉียงใต้ ขนานกับ

แม่น้ำโขงจนบรรจบแม่น้ำมูล มีเพียงช่วงที่ไหลผ่านมหาสารคามถึงร้อยเอ็ด ซึ่งเป็นบริเวณที่ศึกษาทะเลสาบรูปแอกนี้เท่านั้น ที่ลักษณะทิศทางการไหลค่อนข้างอยู่ในแนวตะวันออก ตะวันตก ต่างจากแม่น้ำมูลที่มีทิศทางการไหลตะวันตก ตะวันออก เป็นส่วนใหญ่ (แผนที่ 1)

ลักษณะของลำน้ำจากปากน้ำพองลงไป ร่องน้ำเริ่มคดเคี้ยวเป็นคูก้นน้ำ มากขึ้นจนเกิดทะเลสาบรูปแอกหรือกุดอยู่ทั่วไป โดยเฉพาะจะปรากฏอย่างมากมาย ช่วงระยะอำเภอมือเมืองมหาสารคาม ถึงอำเภอร้อยเอ็ด มากกว่า 60 กุด แต่ที่น้ำสังเกตได้ปากลำน้ำลงไปจนบรรจบแม่น้ำมูล จำนวนกุดหรือบึงโค้งกลับ สดลงทั้งที่ระดับน้ำต่ำกว่า และจากการสำรวจสภาพอุทกวิทยาลุ่มน้ำชีของ กรมชลประทาน (ตาราง 2) ปริมาณน้ำไหล ความเร็วกระแสน้ำและปริมาณ ตะกอนที่ตรวจวัดตามสถานีที่เลือกมา จะเห็นว่าที่สถานีท่าพระ อำเภอมือ- ขอนแก่น ที่อยู่เหนือปากน้ำพองขึ้นไปมีปริมาณน้ำ 2,070 ล้านลูกบาศก์เมตรหรือ 65.5 ลูกบาศก์เมตร ต่อวินาที ความเร็วเฉลี่ยตลอดร่องน้ำ 0.70 เมตรต่อวินาที และปริมาณตะกอนเฉลี่ย 351,567 ตันต่อปี แต่ที่สถานีวัดไ้ อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดมหาสารคาม ตอนล่างน้ำพองปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวเป็น 4,062 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ที่สถานีวัดศรีธรรมมาราม อำเภอมือยโสธร ซึ่งอยู่ ตอนล่างของลำน้ำป่าวและน้ำยัง ปริมาณน้ำไหลออกและปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นเป็น 6,874 ล้านลูกบาศก์เมตร และ 831,272 ตันต่อปี ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีว่าด้วย ลำน้ำ แตกต่างจากแม่น้ำเจ้าพระยาที่ปริมาณ

ตาราง 2 แสดงสถานะทางอุทกวิทยาของแม่น้ำชี

สถานี	ปริมาณน้ำไหลออก		ความเร็ว ม/วินาที	ตะกอนน้ำพา ตัน/ปี	ระยะสถิติ
	ล้าน ม ³ /ปี	ม ³ /วินาที			
ท่าพระ	2070	65.5	.70	351567	2501-2518 ✓
โกสุมพิสัย	4062	126.9	.72	—	2499-2516
ท่าขอนยาง	5355	129.7	.72	—	2498-2518
ยโสธร	6774	216.4	.53	831272	2494-2518

ที่มา : กองอุทกวิทยา กรมชลประทาน

น้ำก่ดลลดลงเมื่อใกล้เข้าไปสู่ปากน้ำ ทั้งนี้เพราะลำคลองต่าง ๆ นั้นเอง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำท่าที่ตรวจวัดได้ปรากฏว่า น้ำท่าของกลุ่มน้ำมูล-ชี ราว 95% เกิดในฤดูฝน ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม ส่วนอีก 5% เกิดในฤดูแล้งจากพายุไต้ฝุ่นถึงเมษายน ซึ่งเป็นฤดูแล้งฤดูร้อนวันออกเฉียงเหนือไม่มีฝน การที่น้ำท่าส่วนใหญ่เกิดในฤดูฝน สันนิษฐานว่า สภาพลุ่มน้ำทั่วไปไม่มีป่าดิบปกคลุม เกิดน้ำท่าได้รวดเร็วประการหนึ่งและลักษณะดินทั่วไปในลุ่มน้ำไม่อุ้มน้ำอีกประการหนึ่ง เป็นผลให้น้ำแล้งมีน้ำน้อยสภาพทั่วไปในลุ่มน้ำจึงกล่าวได้ว่า ขาดแคลนน้ำท่าในฤดูแล้ง (คำรงค์, 2516 : 6) เพื่อให้ทราบสภาพปริมาณน้ำของแม่น้ำชีและลำน้ำสาขา ที่ตรวจวัด ณ สถานีต่าง ๆ คัดเลือกมาสรุปได้ดังนี้

(ตาราง 3)

ตาราง 3 แสดงปริมาณน้ำท่าของแม่น้ำชีและลำน้ำสาขา ๗ สถานี
ต่าง ๆ

ลำน้ำ	สถานี	เนื้อที่ลุ่มน้ำ	ปริมาณน้ำ เฉลี่ย ล้าน ม ³ /ปี	ระยะสถิติ
ต้นน้ำชี	บ้านหนองอ้อ	2906	875	2504-2512
ต้นน้ำชี	เหนือชัยภูมิ	4254	1021	2501-2512
ต้นน้ำชี	ใต้ชัยภูมิ	8912	1591	2511-2512
ชี	ใกล้มัญจาคีรี	11020	1601	2510-2512
ชี	ท้าวพระ	13171	2376	2501-2512
ชี	โกสุมพิสัย	29803	4149	2499-2512
ชี	ท่าขอนยางมหาสารคาม	30783	4369	2498-2512
ชี	ยโสธร	47406	7059	2494-2512
น้ำพอง	เขื่อนอุบลรัตน์	12089	2226	2500-2507
น้ำพอง	ขอนแก่น	13168	2268	2499-2507
ลำปาว	หนองสองห้อง	5542	963	2506-2511
น้ำยัง	เหนือโพนทอง	2061	740	2504-2512

ที่มา : กองอุทกวิทยา กรมชลประทาน

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตรวจสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ แบ่งออกเป็น 4 ตอน ดังต่อไปนี้ คือ

1. วิเคราะห์วัฏจักรการสึกกร่อน (Cycle of erosion) ของ พัฒนาการลักษณะภูมิประเทศลุ่มน้ำชี
2. วิเคราะห์มิติทางธรณีสัณฐานที่เป็นองค์ประกอบร่วมของการเกิด ทะเลสาบรูปแอก
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางธรณีสัณฐาน ที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบ รูปแอก
4. การสร้างสมการพยากรณ์ลักษณะธรณีสัณฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแอก

1. การวิเคราะห์วัฏจักรการสึกกร่อนของพัฒนาการลักษณะภูมิประเทศลุ่มน้ำชี

เพื่อเป็นการทดสอบว่า การสึกกร่อนนี้จะสอดคล้องหรือขัดแย้งกับ สมมุติฐานการวิจัยข้อที่ 1 ที่ว่า "ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแอกน่าจะอยู่ใน ขั้นตอนปลายหรือปัจฉิมวัย (Old Age stage) ของกระบวนวัฏจักรการพัฒนาลักษณะ ภูมิประเทศ ตามทฤษฎีของเดวิส (Davis)" ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวพิภพที่ เหลือจากการถูกกัดกร่อนชะล้างพังทลาย ด้วยกระบวนการลดระดับ (denudational processes) ที่มีแรงน้ำไหลของระบบลุ่มน้ำเป็นตัวการสำคัญ หรืออีกนัยหนึ่งเป็น การวิเคราะห์หามวลที่ถูกกัดกร่อน หรือถูกชะล้างพัดพาขนย้ายไป โดยกระบวนการ Fluvial processes มากน้อยเพียงใด ทั้งนี้เพื่อที่จะทราบว่าลักษณะภูมิประเทศ ของลุ่มน้ำชีมีลักษณะอย่างไร โดยเฉพาะลุ่มน้ำชีช่วงที่เกิดทะเลสาบรูปแอก ผู้วิจัยได้ วิเคราะห์แบบฮิโไซเมตริก (Hypsometric Analysis) ด้วยการหาลักษณะการ แจกกระจายพื้นที่ผิวใน (ground surface area) ของพื้นพิภพ (landmass)

ตามวิธีการของสตาร์เลอร์ (Starhler) โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพื้นที่ต่ออัตราส่วนของความสูง จากการรวบรวมข้อมูลพบว่า ความสูงทั้งหมดของพื้นที่รับน้ำ (total height of basin) ที่ได้จากจุดสูงสุด (summit plane) บริเวณภูเขาอู่นางและภูเขาบอดชีสูง 1310 เมตร กับจุดต่ำสุด (base plane) ของลุ่มน้ำซึ่งที่ปากแม่น้ำบรรจบกับแม่น้ำมูล สูง 120 เมตร ดังนั้นความต่างระดับหรือความสูงที่ลำนน้ำไหลผ่าน (height different) 1090 เมตร (H) พื้นที่รับน้ำทั้งหมดของแอ่งลุ่มน้ำ 48,898.75 ตารางกิโลเมตร (A) อัตราส่วนของความสูงตรงระหว่างเส้นชั้นความสูงที่ต้องการทราบ กับอัตราส่วนของพื้นที่ระหว่างเส้นชั้นความสูงที่ศึกษา ปรากฏผลตามตาราง

ตาราง 4 แสดงอัตราส่วนของพื้นที่และอัตราส่วนของความสูงในภูมิประเทศลุ่มน้ำชี

ความสูงต่างระหว่าง เส้นชั้นความสูง	อัตราส่วนระหว่าง $\frac{h}{H}$	พื้นที่ระหว่างเส้นชั้นความสูง เป็น ก.ม. ²	อัตราส่วนระหว่าง $\frac{a}{A}$
1310 - 120 = 1190	1.0000	1310-1000= 360.175	.0073
1000 - 120 = 880	0.7395	1000- 900= 698.375	.0143
900 - 120 = 780	0.6555	900- 800= 776.250	.0158
800 - 120 = 680	0.5714	800- 700= 660.625	.0118
700 - 120 = 580	0.4874	700- 600= 981.875	.0200
600 - 120 = 480	0.4034	600- 500= 1054.575	.0215
500 - 120 = 380	0.3193	500- 400= 1656.250	.0338
400 - 120 = 280	0.23529	400- 300= 221.125	.0453
300 - 120 = 180	0.15120	300- 200= 15212.52	.3111
200 - 120 = 80	0.6722	200- 120= 25265.000	.5167

การวิเคราะห์แบบ Hypsometric Analysis จะต้องสร้าง hypsometric curve เพื่อ integrate หาพื้นที่ใต้ curve และเมื่อนำค่าจากตาราง ไปสร้างกราฟ (ดังกราฟ 3) จะเห็นว่าเส้นโค้งของกราฟไปเป็น smooth curve และไม่ต่อเนื่อง (Continuous) นั่นคือ curve ไม่อยู่ในรูป hyperbolic ดังนั้นการ integrate จึงต้องแยก integrate เป็นช่วง ๆ แบบ Partition รวม 9 ช่วง แล้วนำค่า integrate ที่ได้รวมกัน ผลปรากฏตามตาราง 5

ตาราง 5 แสดงค่า integrate ที่คำนวณได้แต่ละช่วงภายใต้เส้นโค้ง

ช่วงระยะที่ integrate		ค่า integrate
$Y_1 - Y_2$	$X_2 - X_1$	0.003805
$Y_2 - Y_3$	$X_3 - X_2$	0.008400
$Y_3 - Y_5$	$X_5 - X_3$	0.004000
$Y_5 - Y_6$	$X_6 - X_5$	0.001737
$Y_6 - Y_7$	$X_7 - X_6$	0.003054
$Y_7 - Y_8$	$X_8 - X_7$	0.003364
$Y_8 - Y_9$	$X_9 - X_8$	0.015330
$Y_9 - Y_{10}$	$X_{10} - X_9$	0.034760
$Y_{10} - Y_{11}$	$X_{11} - X_{10}$	0.051044
รวม		0.125494

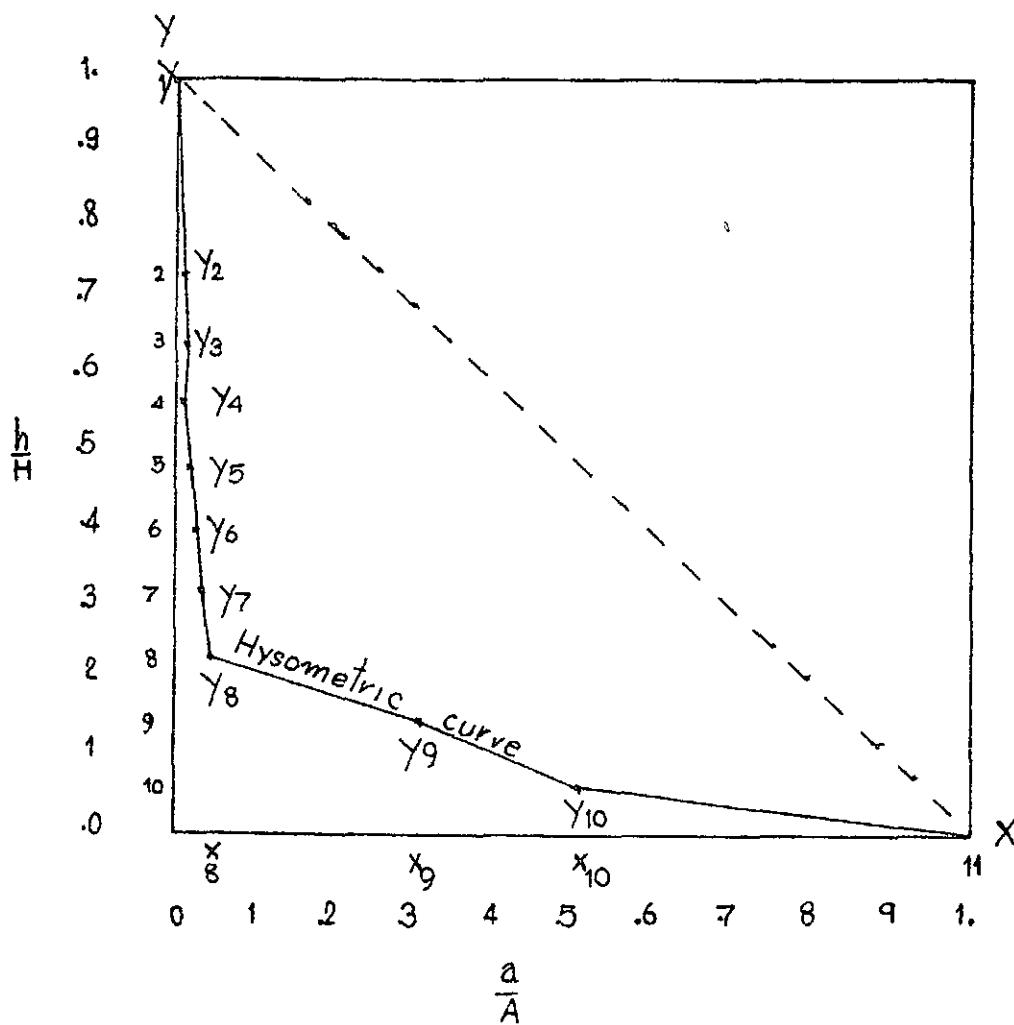
ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการ integrate ดังตาราง 5 พบว่า พื้นที่ใต้ hypsometric curve หรือค่า hypsometric integration มีค่าเท่ากับ

0.125494 หรือ 12.5494% แสดงว่า ยังเหลือพื้นที่ที่ไม่ได้ถูกกัดกร่อนชะล้างพัดพาไปโดยขบวนการลกระดับและขบวนการเสริมสร้าง 12.5494% หรืออีกนัยหนึ่งพื้นที่ผิวพื้น (ground surface area) ของพิภพได้ถูกกัดกร่อนชะล้างพังทลายไปโดยขบวนการพัดพาขนย้าย (Fluvial processes) ถึง 87.4506% นั่นคือ ลักษณะภูมิประเทศบริเวณลุ่มน้ำชีตลอดลุ่มน้ำอยู่ในขั้นปัจฉิมวัย (Old Age stage) โดยเฉพาะลุ่มน้ำชีบริเวณที่เกิดทะเลสาบรูปแอก อยู่ในบริเวณพื้นที่ของ $Y_{10} - Y_{11}$ กับ $X_{11} - X_{10}$ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีพื้นที่ 25,265 ตารางกิโลเมตร ที่มีความสูงต่ำกว่า 200 เมตร เมื่อพิจารณาค่า integrate ที่คำนวณได้ในช่วงนี้มีเพียง .051044 หรือยังเหลือพื้นที่ที่ยังไม่ได้ถูกกัดกร่อนพัดพาไป 5.1044% ในขณะที่พื้นผิวดินส่วนใหญ่ได้ถูกพัดพาขนย้ายไป 94.8956% ตามความเชื่อของเควิส ถือว่าเป็นลักษณะภูมิประเทศที่เกือบเป็นที่ราบในอุดมคติ (Peneplain) ดังนั้นการเกิดทะเลสาบรูปแอกจึงเกิดในลักษณะภูมิประเทศที่อยู่ในขั้นปัจฉิมวัย หรือขั้นตอนปลายของวัฏจักรแห่งการพัฒนาภูมิประเทศ ผลการวิเคราะห์นี้จึงสอดคล้องกับสมมุติฐานการวิจัยข้อ 1 ที่ตั้งไว้

2. การวิเคราะห์ทางธรณีสัณฐานที่เป็นองค์ประกอบร่วมของการเกิดทะเลสาบรูปแอก

ผลของการวิเคราะห์นี้เพื่อต้องการทราบตัวแปรหรือมิติของลักษณะทางธรณีสัณฐานทั้ง 12 มิติ ที่ได้มาโดยการวัดจากแผนที่ของบริเวณที่มีทะเลสาบรูปแอกจะเป็นองค์ประกอบร่วม (Common factor) ที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกจริงหรือไม่ ซึ่งเป็นการตรวจสอบสมมุติฐานการวิจัยข้อ 2 ที่ว่า "การเกิดทะเลสาบรูปแอกของแม่น้ำชีเป็นผลมาจากมิติทางธรณีสัณฐานต่าง ๆ ดังนี้ ความแคบแควของลำน้ำ ความชันของลำน้ำ ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอก ขอบเขตคูกน้ำ รัศมี ความโค้ง ความลาดชันคานข้าง ลักษณะดิน ระดับของทะเลสาบรูปแอก ความกว้างลุ่มน้ำ ช่วงยาวคูกน้ำ ช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก และระยะทางทะเลสาบรูปแอก" ผู้วิจัยนำคามิติทางธรณีสัณฐานที่วัดจากแผนที่ทุกมิติมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างมิติเหล่านั้น ปรากฏผลตามตาราง 6 เพื่อความสะดวกในการเขียนและ

กราฟ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่กับความสูง



การเสนอตาราง จึงใช้สัญลักษณ์แทนมิติหรือตัวแปร ดังนี้

O1	คือ	ระดับของทะเลสาบ
Vw	คือ	ความกว้างลุ่มน้ำ
St	คือ	ความคดเคี้ยวลำน้ำ
Ag	คือ	มุมร่องน้ำโค้ง
Re	คือ	รัศมีความโค้ง
Od	คือ	ระยะทางทะเลสาบรูปแอก
So	คือ	คุณสมบัติดิน
O1	คือ	ช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก
Mb	คือ	ขอบเขตคูกน้ำ
M1	คือ	ช่วงยาวคูกน้ำ
Vs	คือ	ความลาดชันด้านข้างลุ่มน้ำ
Os	คือ	ความลาดชันระหว่างทะเลสาบ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในตาราง 6 พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ภายในระหว่างมิติทางธรณีสัณฐานทั้ง 12 มิติ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นตรงไม่สูงมากนัก ค่าสหสัมพันธ์ที่นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $\alpha = .01$ และ $.05$ นั้นมีค่าสหสัมพันธ์ทั้งบวกและลบ มีพิสัยตั้งแต่ $-.29687$ ถึง $.58042$ มิติหรือตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันทางบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $.01$ มี 6 คู่ ได้แก่ ความลาดชันระหว่างทะเลสาบ กับระดับของทะเลสาบรูปแอก ขอบเขตคูกน้ำกับช่วงยาวคูกน้ำ ความคดเคี้ยวลำน้ำกับมุมร่องน้ำโค้ง ขอบเขตคูกน้ำกับความคดเคี้ยวลำน้ำ รัศมีความโค้งกับความคดเคี้ยวลำน้ำ มุมร่องน้ำโค้งกับความลาดชันด้านข้าง นั่นคือ เมื่อค่ามิติทางธรณีสัณฐานตัวหนึ่งเพิ่มขึ้น ค่ามิติอีกตัวก็จะแปรผันเพิ่มขึ้น

ตาราง 6 แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในระหว่างมิติทางจิตวิญญาณของทะเลสาบรูปแอก

ตัวแปร	Ol	Vw	St	Ag	Rc	Od	So	Ol	Mb	ML	Vs	Os
Ol	1.0000	.3006*	.0079	-.0593	-.0537	-.1654	.1321	.0325	-.0083	.0726	.3093*	** .5804
Vw	.3006*		-.2088	-.1331	-.0897	.1843	.0936	.2361	-.2417	-.1678	.0912	-.0358
St	.0079	-.2088		** .3521	** .3373	-.2025	-.0513	.2524	** .5139	.0853	.0524	* .2621
Ag	-.0593	-.1331	** .3521		** .3722	-.2453	-.0692	.3005	.1844	* .2969	** .3370	.0125
Rc	-.0537	-.0897	** .3373	** .3722		-.0110	.0611	.0402	* .2578	-.0268	.1343	.0562
Od	-.1654	.1843	-.2025	-.2453	-.0110		-.1649	-.2085	-.2270	-.1138	-.1604	-.1110
So	.1321	.0936	-.0513	-.0692	.0611	-.1649		.0337	* .2542	.1381	-.0567	.1183
Ol	.0325	.2361	.2524*	.3005*	.0402	* .2085	.0337		.1620	-.0570	.0612	-.0438
Mb	-.0083	-.2416	** .5139	.1844	* .2578	-.2270	* .2542	.1620	** .4747	.4741	.0759	.2109
ML	.0726	-.1678	.0853	-.2969	-.0268	-.1138	.1381	-.0570			-.1075	.2205
Vs	.3093*	.0912	.0524	** .3370	.1343	-.1604	-.0567	.0612	.0759	-.1075		* .3030
Os	.5804**	-.0358	.2621*	.0125	.0562	-.1110	.1183	-.0438	.2109	.2205	* .3030	1.0000

** มีนัยสำคัญ .01, * มีนัยสำคัญ .05

ควย เช่น ถ้าค่าความลาดชันระหว่างทะเลสาบเพิ่มขึ้น ค่าของระดับทะเลสาบก็จะเพิ่มขึ้น ลักษณะภูมิประเทศของลุ่มน้ำทั้งภาพตัดตามยาวและตัดตามขวางจะมีความลาดที่สูงหรือถ้าขอบเขตลุ่มน้ำกว้างออกช่วงยาวลุ่มน้ำก็จะยาวขึ้น หรือลุ่มน้ำมีความคดเคี้ยวเพิ่มขึ้นมากเท่าใดก็จะทำให้ มุมร่องน้ำโค้งสูงขึ้น ทำให้ขอบเขตลุ่มน้ำกว้างออก และทำให้ รัศมีความโค้งของลุ่มน้ำแปรผันตามควย ในทางกลับกัน ถ้าขอบเขตลุ่มน้ำ รัศมีความโค้ง และมุมร่องน้ำโค้งมีมิตินมากขึ้น ย่อมอนุมานได้แน่ว่าลักษณะรูปแบบของลุ่มน้ำนั้นจะคดเคี้ยวมากขึ้นควย

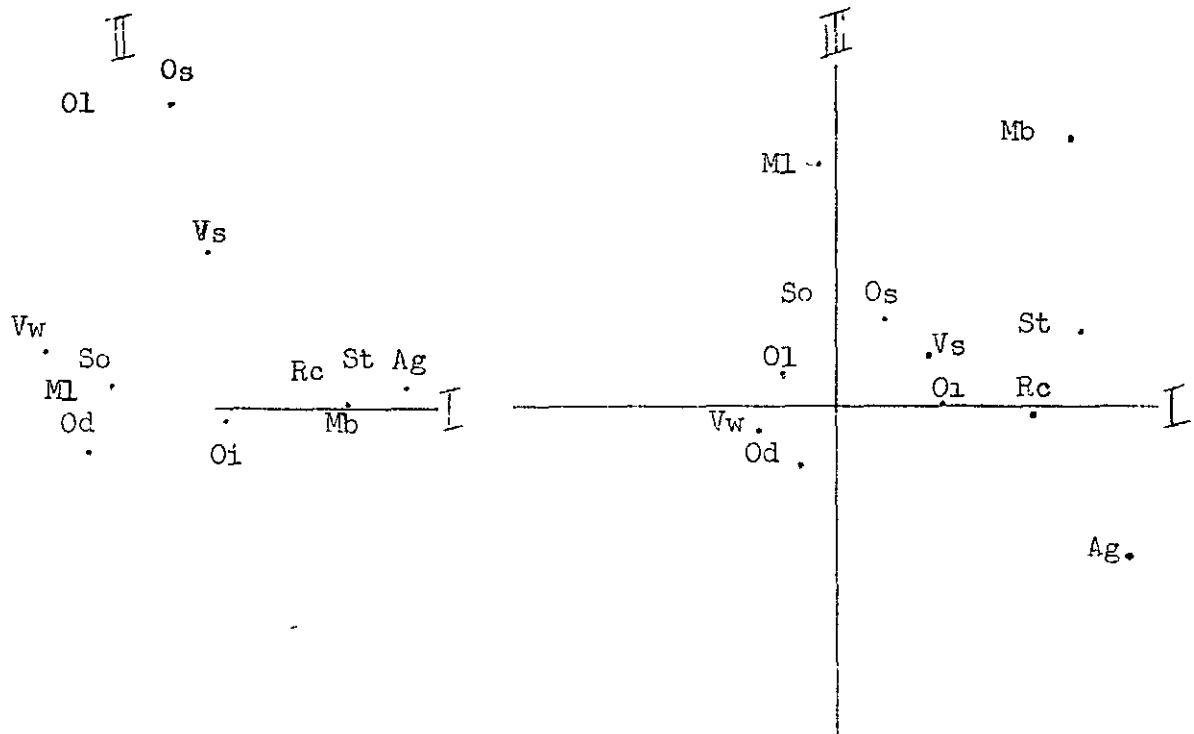
มิติหรือตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันทางบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $\alpha = .05$ มี 7 ตัว ได้แก่ ความกว้างลุ่มน้ำ กับระดับทะเลสาบ ความลาดชันด้านข้างกับระดับทะเลสาบ ความลาดชันระหว่างทะเลสาบกับความคดเคี้ยวลำน้ำ มุมร่องน้ำโค้งกับช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก รัศมีความโค้งกับขอบเขตลุ่มน้ำ ลักษณะดินกับขอบเขตลุ่มน้ำ และความลาดชันด้านข้างกับความลาดชันระหว่างทะเลสาบ ค่าสหสัมพันธ์ทางลบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น .05 มี 1 ตัว ได้แก่ มุมร่องน้ำโค้งกับช่วงยาวลุ่มน้ำ หมายความว่า เมื่อมุมร่องน้ำโค้งสูงขึ้น ช่วงยาวลุ่มน้ำกลับสั้นลง หรือถ้าช่วงยาวลุ่มน้ำขยายยาวออก ลักษณะมุมร่องน้ำโค้งจะลดต่ำลง เพราะลำน้ำที่ช่วงยาวลุ่มน้ำมีค่าสูง ลักษณะลำน้ำนั้นจะมีความคดเคี้ยวและรัศมีความโค้งของลุ่มน้ำต่ำ มุมร่องน้ำโค้งจึงลดต่ำควย ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหรือมิติที่ไม่ได้กล่าวไว้ในนี้ ล้วนแต่เป็นค่าสหสัมพันธ์ที่ไม่มีความสำคัญทางสถิติ ซึ่งมีถึง 50 ตัว นั่นคือ มิติทางธรณีสัณฐานทั้ง 12 ตัว มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันเป็นเส้นตรงอย่างไม่ชัดเจน โดยเฉพาะระยะทางของทะเลสาบรูปแอก (Ox-bow lake distance) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับมิติหรือตัวแปรอื่น ๆ อย่างไม่มีนัยสำคัญทั้ง 11 ตัวแปร และเป็นที่น่าสนใจว่า ลักษณะดินกับช่วงระยะทะเลสาบมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ ต่ำถึง 10 ตัวแปร นอกจากนี้ ความลาดชันด้านข้างและรัศมีความโค้งของลุ่มน้ำก็มีค่าสหสัมพันธ์กับตัวแปร

ต่าง ๆ ค่าถึง 8 ตัวแปร แสดงว่า ลักษณะทางธรณีสัณฐานทางมิติไม่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก จึงทำให้สงสัยว่า ระยะทางทะเลสาบ คุณลักษณะดิน ช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก รัศมีความโค้งของคูก้น้ำและความลาดชันคานข้าง อาจจะไม่เป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกร่วมกับตัวแปรทางธรณีสัณฐานตัวอื่น ๆ อย่างไรก็ตามค่าสหสัมพันธ์ภายในนี้ ไม่สามารถชี้ให้เห็นอย่างเด่นชัดนักว่าข้อสงสัยนี้จะจริงหรือไม่ จึงต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบอีกครั้งหนึ่ง

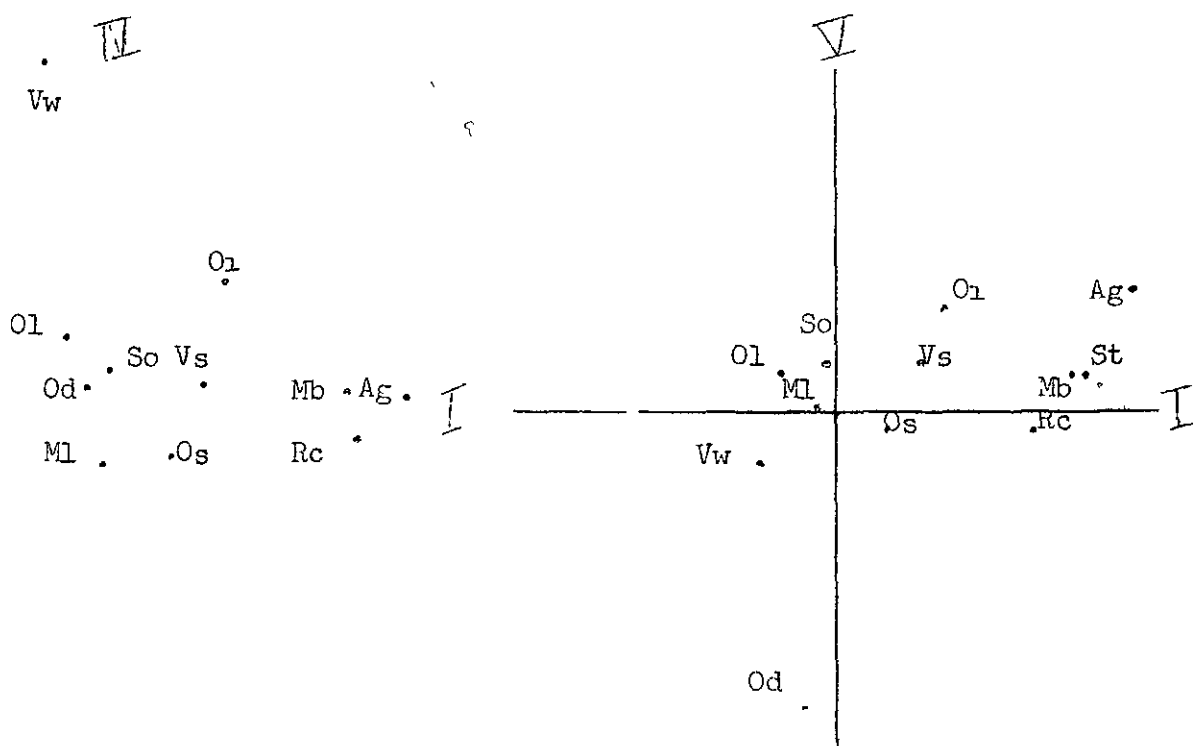
การหาค่าน้ำหนักองค์ประกอบของมิติทางธรณีสัณฐานแต่ละมิติ ปรากฏผลตามตาราง 7 นั้น เมื่อพิจารณาทุกองค์ประกอบ จะเห็นว่าไม่มีองค์ประกอบใดที่เป็นบวกหรือลบทั้งหมดรวมทั้งมีค่าน้ำหนักตัวประกอบสูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกตัวประกอบ จึงสรุปได้ว่า มิติทางธรณีสัณฐานทั้ง 12 มิติ ไม่ได้เป็นองค์ประกอบร่วม ที่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกร่วมกันทุกมิติ โดยเฉพาะเมื่อพิจารณา คุณลักษณะดิน ความลาดชันคานข้าง ช่วงระยะทะเลสาบ และรัศมีความโค้ง พบว่า ตัวประกอบหรือมิติเหล่านี้ มีค่าน้ำหนักขององค์ประกอบร่วมกับตัวแปรอื่นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติทุกองค์ประกอบ (Factors) ซึ่งชี้ให้เห็นข้อสงสัยที่ว่ามิติหรือตัวแปรดังกล่าว อาจจะไม่เป็นองค์ประกอบทางธรณีสัณฐานของทะเลสาบรูปแอกร่วมกับตัวแปรต่าง ๆ นั้นเป็นความจริง ยิ่งกว่านั้น เมื่อพิจารณาค่า Communalities (h^2) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่าตัวแปรต่าง ๆ มีส่วนส่งผลร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ มากน้อยเพียงใดนั้น จะพบว่ากลุ่มตัวแปรเหล่านี้มีค่า h^2 ค่า อย่างไม่มีนัยสำคัญ กล่าวคือ ค่า h^2 ของลักษณะดิน ช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก ความลาดชันคานข้าง และรัศมีความโค้งมีค่า .1193 .2742, .2772 และ .2481 ตามลำดับ หรือในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาค่า Unique factor ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่า ตัวแปรนั้น ๆ มีลักษณะเอกลักษณ์เฉพาะตนเอง มากน้อยเพียงใด กล่าวคือ ถ้าตัวแปรนั้นมีค่าลักษณะเอกลักษณ์เฉพาะตนเองสูง แสดงว่า ตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ ค่า นั้นคือ ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลร่วมหรือเป็นองค์ประกอบร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ น้อย ค่า Unique factor จึงสูง เช่น

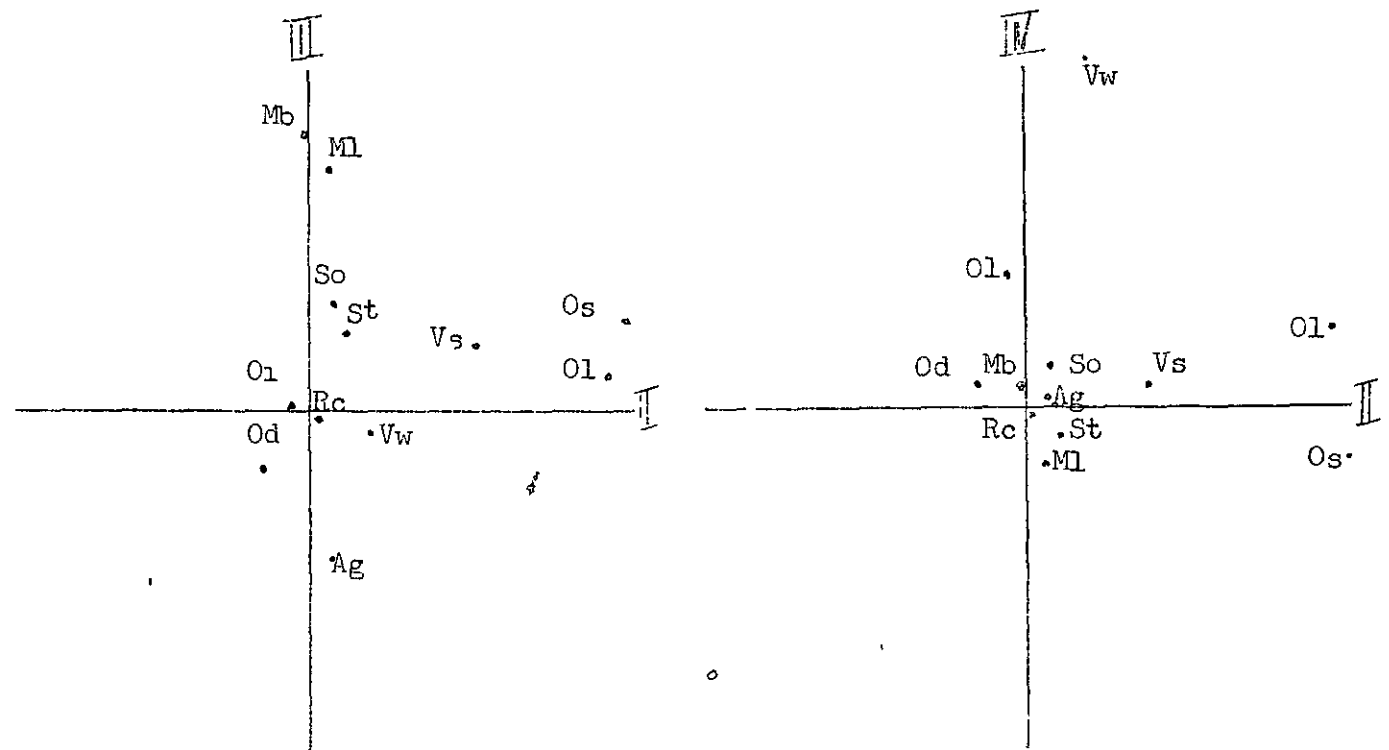
ลักษณะดิน .93844 ช่วงระยะทะเลสาบ .85193 ความลาดชันด้านข้าง .85020 และรัศมีความโค้ง .86709 แสดงว่า ตัวแปรเหล่านี้ไม่ได้เป็นตัวประกอบร่วมของ องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก ชื่อน้ำสังเกตุอีก ประการหนึ่งคือ ตัวแปรระยะห่างของทะเลสาบ ที่สงสัยว่าจะไม่ใช่องค์ประกอบร่วมทาง ธรณีสัณฐาน เพราะค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ร่วมกับตัวแปรต่าง ๆ ค่าทุกตัวนั้น แต่ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบ ผลปรากฏว่า ค่าน้ำหนักตัวประกอบ .4735 และค่า Communalilty .6624 มีนัยสำคัญทางสถิติสูง อย่างไรก็ตาม ค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ที่ปรากฏตามตาราง 7 นั้น เป็นค่าน้ำหนักที่ยังไม่ได้หมุนแกน จึงไม่ชัดเจนในการ แปลความหมาย ผู้วิจัยจึงทำการหมุนแกนแบบ Orthogonal Rotation ตามวิธี Varimax Method ของ ไคเซอร์ (Kaiser) ผลการวิเคราะห์ปรากฏดังตาราง 8

เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (factor loading) ทุกองค์ประกอบ ภายหลังจากการหมุนแกน จะพบว่า ตัวแปร รัศมีความโค้งของกึ่งน้ำ (Radius of curvature) และความลาดชันด้านข้าง (Valley side slope) ที่สงสัยว่าไม่ เป็นองค์ประกอบร่วมทางธรณีสัณฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกร่วมกับตัวแปร อื่น ๆ นั้นไม่เป็นความจริง เพราะค่าน้ำหนักองค์ประกอบภายหลังจากการหมุนแกน .4951 และ .4171 มีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้ง ๆ ที่ผลการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ทั้งจากตาราง สหสัมพันธ์ (correlation matrix) ตัวแปรทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับ ตัวแปรอื่น ๆ ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติถึง 8 ตัวแปร และค่าน้ำหนักตัวประกอบจากตาราง องค์ประกอบ (factor matrix) ต่างก็ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ค่าน้ำหนัก องค์ประกอบของช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก และคุณลักษณะดิน จากตารางองค์ประกอบ ภายหลังจากการหมุนแกนก็ยังมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่ามีอิทธิพล หรือ ตัวแปรทางธรณีสัณฐานทั้งสองมิติ ไม่ได้เป็นองค์ประกอบร่วมที่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบ- รูปแอกจริง หมายความว่า คุณลักษณะของดินแม้จะประกอบด้วยดินทราย, ซิลต์ (silt) และดินเหนียว (clay) มากน้อยอย่างไรก็ไม่ใช่ว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิด

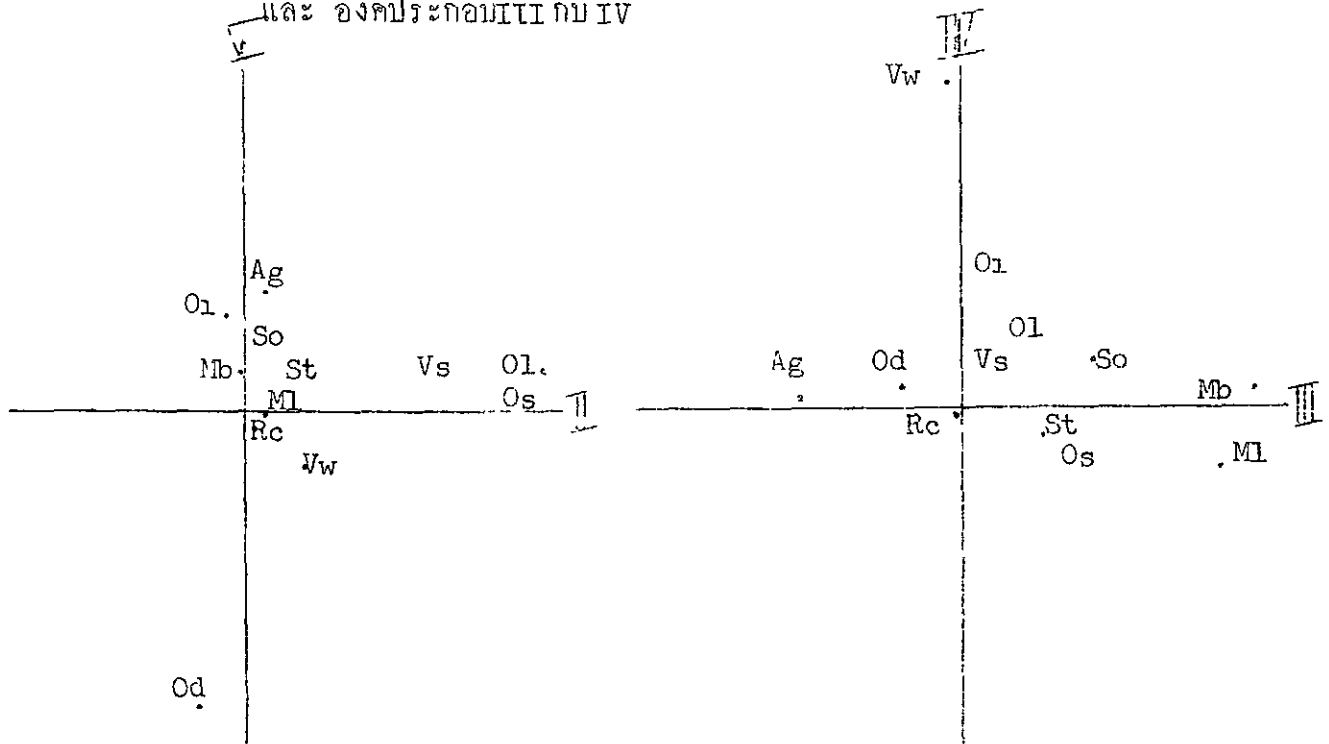


ภาพที่ 13 แสดงตำแหน่งมิติทั้ง 12 มิติ ขององค์ประกอบ I กับ II, III, IV, V

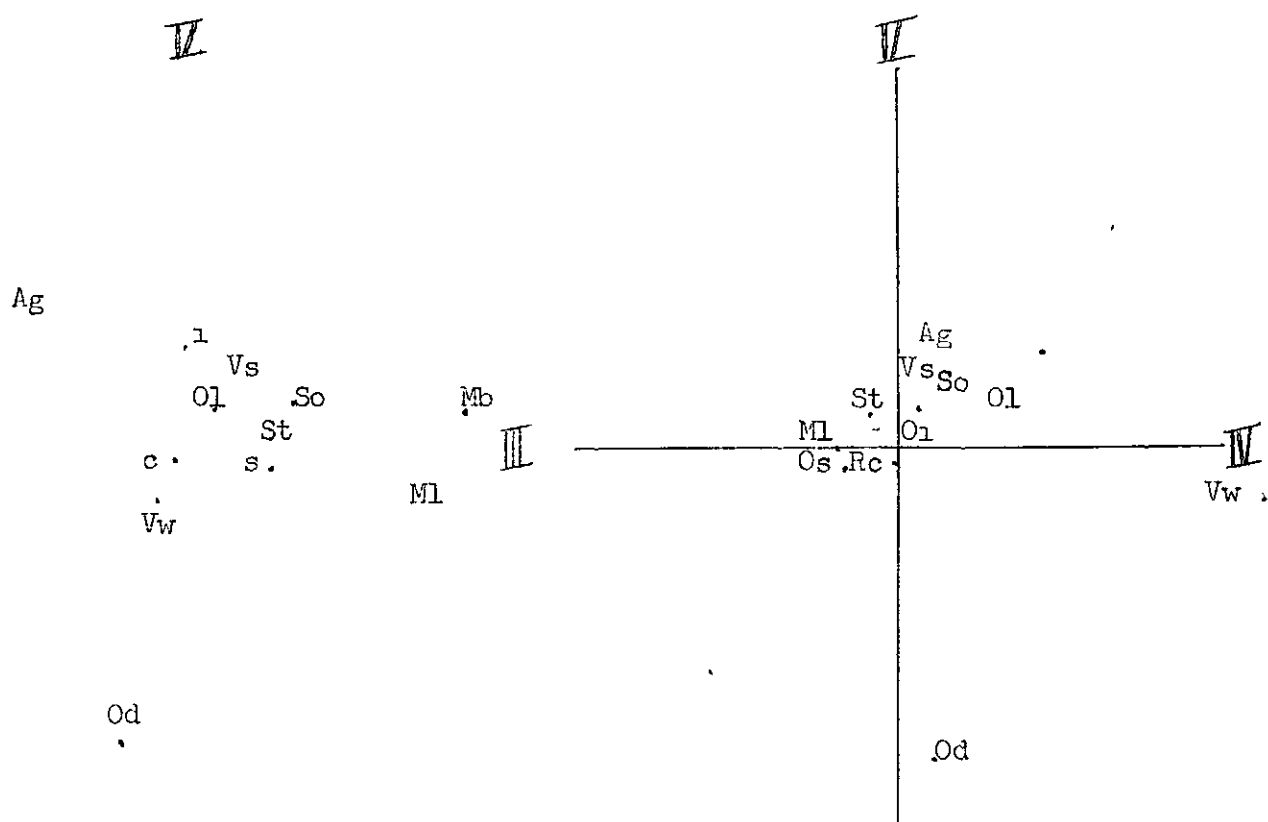




ภาพที่ 14 แสดงตำแหน่งตัวแปรทั้ง 12 มิติ ขององค์ประกอบ II กับ III, IV, V และ องค์ประกอบ III กับ IV



ภาพที่ 15 แสดงตำแหน่งตัวแปรทั้ง 12 นิตินขององค์ประกอบ
III กับ V และ IV กับ V



ทะเลสาบรูปแอก และในลักษณะเดียวกัน ช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก (Oxbow - lakes Interval) ที่เป็นมิติทางการแจกกระจายของทะเลสาบรูปแอก ก็เป็นอีกมิติหนึ่งที่ไม่มิตีผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก ดังนั้นจึงมีเพียง 10 ตัวแปร เท่านั้นที่เป็นองค์ประกอบทางธรณีสัณฐาน ที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก จากผลของการวิเคราะห์เชิงกักกันหรือปฏิเสธสมมติฐานการวิจัยข้อ 2 ที่ตั้งไว้ เพื่อให้มองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์โครงสร้างหรือสหสัมพันธ์ของตัวแปรกับองค์ประกอบ ในแต่ละองค์ประกอบ ผู้วิจัยจึงนำเอาค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างองค์ประกอบหรือน้ำหนักตัวประกอบมาสร้างเป็นภาพหาค่าแห่งของตัวแปรบนองค์ประกอบทั้ง 5 ดังภาพ 13-15 จากภาพดังกล่าว พบว่า ตำแหน่งของตัวแปรในองค์ประกอบแต่ละคู่จะแปรผันไป ดังเช่น ตำแหน่งของตัวแปรระหว่างองค์ประกอบที่ I กับ II และ IV มีลักษณะคล้าย ๆ กัน พวกที่มีน้ำหนักองค์ประกอบสูงจะเกาะกลุ่มกันได้แก่ St, Ag, Rc และ Mb และพวกที่มีน้ำหนักองค์ประกอบต่ำก็เกาะกลุ่มกันอยู่ใกล้จุดกำเนิด ได้แก่ Od, So, Ml ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันของตัวแปร การที่ตัวแปรมีตำแหน่งใกล้เคียงกันหรือสัมพันธ์กันย่อมชี้ให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านั้นมีลักษณะร่วมกัน โดยเฉพาะตำแหน่งของตัวแปรระหว่างองค์ประกอบที่ II กับ IV, V และองค์ประกอบ IV กับ V จะเห็นตำแหน่งของตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญเกาะกลุ่มกันใกล้จุดกำเนิดอย่างเด่นชัด นั่นคือ ตัวแปรเหล่านั้นไม่มีคุณลักษณะที่จะส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบเหมือนกัน ส่วนตัวประกอบหรือตัวแปรที่มีน้ำหนักองค์ประกอบหรือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โครงสร้างองค์ประกอบสูง จะอยู่กระจายหรือการเกาะกลุ่มกันอีกลักษณะหนึ่ง

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบ

ผลการวิเคราะห์นี้ เพื่อศึกษาหาคุณลักษณะและธรรมชาติของการเกิดทะเลสาบรูปแอกในกลุ่มน้ำชี ซึ่งเป็นการตรวจสอบสมมติฐานการวิจัยข้อ 3 ที่ว่า "องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกของแม่น้ำชี น่าจะมีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ" ผู้วิจัยจึงนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายใน ระหว่างมิติทาง

กรณีศึกษาทั้ง 12 มิติ จากตารางแสดงสหสัมพันธ์ภายใน (intercorrelation matrix) มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบ ตามวิธีการ Principal Factor Solution ปรากฏดังตาราง 7

ตาราง 7 แสดงค่าน้ำหนักองค์ประกอบของมิติทางกรณีศึกษาแต่ละมิติที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบก่อนหมุนแกน

มิติหรือตัวแปร	องค์ประกอบ					h^2	U
	I	II	III	IV	V		
ระดับของทะเลสาบ- รูปแอก (Ol)	-.22678	*** .76354	-.02294	-.15022	.05021	.66004	.58306
ความกว้างลุ่มน้ำ (Vw)	.31408	*** .60177	-.37614	*** .57746	-.08711	.94330	.23811
ความลึกเขี้ยวฉานน้ำ (St)	*** -.61750	-.14713	-.06119	.06814	-.17628	.44242	.74671
มุมร่องน้ำโค้ง (Ag)	*** -.51822	-.26424	*** -.67511	-.09789	-.02953	.80460	.44204
รัศมีความโค้ง (Rc)	-.35691	-.16198	-.18072	.02847	-.24708	.24814	.86709
ระยะทางทะเลสาบ (Od)	*** .47348	-.03158	.05215	.02545	*** -.65866	.66239	.58104
ลักษณะดิน (So)	-.14990	.01463	.15418	.19484	.11705	.11932	.93844
ช่วงระยะทะเลสาบ (O ₁)	-.24309	.01445	-.30405	.32515	.12933	.27420	.85193
ขอบเขตทุ่งน้ำ (Mb)	*** -.76344	-.14852	.34574	.37115	-.12137	.87692	.35082
ช่วงยาวทุ่งน้ำ (ML)	-.26124	.07169	*** .59258	.15952	.02690	.45071	.74114
ความลาดชันคานข้าง (Vs)	-.28852	.26340	-.29814	-.18606	-.02589	.27715	.85020
ความลาดชันทะเลสาบ (Os)	*** -.48359	*** .57839	.16984	-.31767	-.19470	.73606	.51370

h^2 คือ Communality,

*** มีนัยสำคัญทางสถิติ, U คือ Unique factor

จากผลในตาราง 7 เป็นค่าน้ำหนักของการหมุนแกน จะเห็นว่าองค์ประกอบของมิติทาง
 ธรณีสัณฐานมี 5 องค์ประกอบ ที่น่าสนใจคือไม่มีองค์ประกอบใดที่ค่าน้ำหนักตัวประกอบเป็น
 บวกหรือลบทั้งหมด แต่ค่าน้ำหนักตัวประกอบในแต่ละองค์ประกอบมีทั้งบวกและลบผสมกันไป
 โดยเฉพาะมิติหรือตัวแปรทางธรณีสัณฐานทุกตัว มีค่าน้ำหนักในองค์ประกอบที่ 1 ไม่สูง
 ทุกมิติ ที่มีน้ำหนักสูงมากคือ ขอบเขตคูกน้ำ -.76344 รองลงไปคือ ความคดเคี้ยว
 ลำน้ำ -.61750 มุมร่อนน้ำโค้ง -.51822 ความลาดชันระหว่างทะเลสาบ
 -.48359 และระยะห่างทะเลสาบ .47348 ลักษณะทางธรณีสัณฐานอื่น ๆ มีค่า
 น้ำหนักองค์ประกอบต่ำอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ
 องค์ประกอบอื่น ๆ นับว่าทุกมิติมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบดีกว่าองค์ประกอบอื่น ๆ

ส่วนองค์ประกอบที่ 2 - 5 มีลักษณะคล้าย ๆ กัน คือค่าอย่างมีนัยสำคัญของ
 น้ำหนักองค์ประกอบมีทั้งบวกและลบ มิติทางธรณีสัณฐานที่มีค่าน้ำหนักสูงอย่างมีนัยสำคัญ
 ในแต่ละองค์ประกอบจะลดลงเรื่อย ๆ กล่าวคือ ในองค์ประกอบที่ 2 มี 3 มิติ ได้แก่
 ระดับของทะเลสาบรูปแอก .76354 ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอก .57839
 และความกว้างลุ่มน้ำ .60177 องค์ประกอบที่ 3 มี 2 ตัวแปร ได้แก่ มุมร่อนน้ำโค้ง
 กับช่วงยาวคูกน้ำ .59258 องค์ประกอบที่ 4, 5 มี 1 ตัวแปร คือ ความกว้าง
 ลุ่มน้ำ .57746 และระยะห่างของทะเลสาบ -.65866 ตัวประกอบอื่น ๆ มีค่า
 น้ำหนักไม่มีนัยสำคัญเพราะไม่ถึง .4000 จึงสรุปได้ว่า ไม่มีองค์ประกอบใดที่มีลักษณะ
 ทางธรณีสัณฐานทั้ง 12 มิติ วัดองค์ประกอบร่วมกันอย่างเด่นชัด

เพื่อพิจารณาค่า Communalities (h^2) ที่ได้จากผลรวมของน้ำหนัก
 ตัวประกอบแต่ละตัวกำลังสอง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่าตัวแปรหรือมิติต่าง ๆ มีส่วนวัด
 รวมกับตัวแปรอื่น ๆ มากน้อยเพียงใด จะเห็นว่าตัวประกอบหรือตัวแปรความกว้าง
 ลุ่มน้ำ (Vw) มีค่าสูงสุด .9433 รองลงมาได้แก่ ขอบเขตคูกน้ำ (Mb) .8769
 มุมร่อนน้ำโค้ง (Ag) .8046 ความลาดชันระหว่างทะเลสาบ (Os) .7360
 ระยะห่างของทะเลสาบ (Od) .6623 ระดับทะเลสาบ ($O1$) .6600

ช่วงยาวกึ่งน้ำ (ML) .4507 และความคลาดเคลื่อน (St) .4424 นอกนั้นเป็นตัวแปรที่มีค่า h^2 ไม่นับสำคัญทางสถิติ และในทิศทางตรงข้าม เมื่อพิจารณา

Unique factor ที่ได้จากผลรวมของน้ำหนักองค์ประกอบแต่ละตัวยกกำลังสองลบจาก 1 แล้วถอดรากที่สอง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่าตัวแปรหรือมิติต่าง ๆ มีส่วนที่เป็นลักษณะเฉพาะตนหรือเอกลักษณ์ของตนเองมากน้อยเพียงใด ถ้าตัวแปรนั้นมีค่า Unique factor สูง แสดงว่ามีลักษณะเอกลักษณ์เฉพาะตนมาก จึงไม่สัมพันธ์กับตัวแปรอื่น นั่นคือ การวัดรวมหรือส่งผลรวมกับตัวแปรอื่น ๆ มีน้อย ในขณะที่ตัวแปรมีลักษณะเฉพาะตนหรือการเป็นเอกภาพของตนเท่านั้นต้องผูกพันหรือสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ คือส่งผลรวมกับตัวแปรอื่นนั่นเอง ตัวแปรที่มีค่า Unique factor ต่ำได้แก่ ความกว้างลุ่มน้ำ .23811 ขอบเขตลุ่มน้ำ .35082 มุมร่องน้ำโค้ง .44204 ความลาดชันระหว่างทะเลสาบ .51370 ระบายของทะเลสาบรูปแอก .58306 ระยะทางทะเลสาบรูปแอก .58104 นอกนั้นเป็นตัวแปรที่มีค่า Unique factor สูง แสดงว่ามีทิศทางหรือพื้นฐานทุกมิติไม่ได้วัดในสิ่งเดียวกัน หรือไม่ได้เป็นองค์ประกอบทางหรือพื้นฐานของทะเลสาบรูปแอก

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าน้ำหนักองค์ประกอบที่ศึกษา พบในตาราง 7 นั้นเป็นค่าน้ำหนักองค์ประกอบที่ยังไม่ได้หมุนแกนจึงไม่ชัดเจนในการแปลความหมาย ผู้วิจัยจึงทำการหมุนแกนแบบ Orthogonal Rotation ตามวิธี Varimax Method ของไคเซอร์ (Kaiser) เพื่อให้ค่าน้ำหนักองค์ประกอบสะดวกต่อการแปลความหมาย ผลการวิเคราะห์ปรากฏดังตาราง 8

ตาราง 8 แสดงค่าน้ำหนักองค์ประกอบของมิติทางธรณีสัณฐานแต่ละตัวภายหลังจากการหมุนแกน

มิติหรือตัวแปร	องค์ประกอบ				
	I	II	III	IV	V
ระดับทะเลสาบ (O1)	-.13074	.76322	.09829	.20089	.10208
ความกว้างลุ่มน้ำ (Vw)	-.19725	.15246	-.06999	.92419	-.14872
ความคดเคี้ยวลำน้ำ (St)	.61388 ^{***}	.09999	.20275	-.07677	.09261
มุมร่องน้ำโค้ง (Ag)	.73019 ^{***}	.05121	-.40330	.03716	.32366
รัศมีความโค้ง (Rc)	.49506 ^{***}	.02501	-.01517	-.01867	-.04303
ระยะทางทะเลสาบ (Od)	-.08370	-.12846	-.15617	.06287	-.78137
คุณสมบัติดิน (So)	-.02272	.06677	.29275	.11181	.12123
ช่วงระยะทะเลสาบ (O1)	.27506	-.04344	.01745	.35202	.26913
ขอบเขตลุ่มน้ำ (Mb)	.58446	-.00585	.72134	-.05568	.10884
ช่วงยาวลุ่มน้ำ (ML)	-.04497	.05272	.64915	-.15641	-.00705
ความลาดชันด้านข้าง (Vs)	.22123	.41706	.17482	.06860	.13785
ความลาดชันทะเลสาบ (Os)	.13366	.80054	.23952	-.13092	-.05304

จากตาราง 8 เพื่อพิจารณาค่าน้ำหนักองค์ประกอบทั้ง 5 จะพบว่า

ในองค์ประกอบที่ 1 นั้น ค่าน้ำหนักของตัวแปรในองค์ประกอบมีพิสัยอยู่

ระหว่าง -.02272 ถึง 0.73019 ซึ่งห่างกันมาก นั่นคือ ค่าน้ำหนักของตัวประกอบมีทั้งค่าสูงและต่ำ ส่วนใหญ่มักจะมีค่าต่ำ ตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางบวกทั้งหมดได้แก่ตัวแปร

มุมร่องน้ำโค้ง	น้ำหนักองค์ประกอบ	.73019
ความคดเคี้ยวลำน้ำ	น้ำหนักองค์ประกอบ	.61388
ขอบเขตคูกน้ำ	น้ำหนักองค์ประกอบ	.58446
รัศมีความโค้ง	น้ำหนักองค์ประกอบ	.49506

ตัวประกอบหรือตัวแปรอื่น ๆ มีค่าน้ำหนักเป็น 0 หรือค่าน้ำหนักน้อยอย่างไม่มีความสำคัญ แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบที่ 1 นั้นมีลักษณะและธรรมชาติทางธรณีสัณฐาน ที่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกในลุ่มน้ำชี ดังนั้นคือ มุมร่องน้ำโค้ง, ความคดเคี้ยวลำน้ำ ขอบเขตคูกน้ำและรัศมีความโค้ง เมื่อดูธรรมชาติของมิติทางธรณีสัณฐานเหล่านี้แล้ว พบว่า มีลักษณะธรณีสัณฐานเนื่องมาจากการไหลสายหรือการไหลเหวี่ยง (swing และการกัดเซาะด้านข้าง (lateral erosion) ของลำน้ำเพื่อพัฒนาเพิ่มขยายความ คดโค้งคดเคี้ยวของคูกน้ำ จนบรรจบไหลตัดทะลุกัน ฉะนั้นองค์ประกอบนี้จึงควรจะได้ ชื่อว่า องค์ประกอบแห่งความคดโค้ง(Channel arc factor) ของลำน้ำ

องค์ประกอบที่ 2 ตัวแปรหรือตัวประกอบที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบสูงอย่างมีนัยสำคัญทางบวกทั้งหมด ได้แก่ ตัวแปรดังต่อไปนี้คือ

ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอก	น้ำหนักองค์ประกอบ	.80054
ระดับของทะเลสาบรูปแอก	น้ำหนักองค์ประกอบ	.76322
ความลาดชันด้านข้างของลุ่มน้ำ	น้ำหนักองค์ประกอบ	.41706

แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบที่ 2 นั้น มีลักษณะและธรรมชาติทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบ ดังนั้นคือ ความลาดชันระหว่างทะเลสาบ ความลาดชันด้านข้าง และระดับทะเลสาบ เมื่อพิจารณาคุณธรรมชาติของตัวแปรเหล่านี้แล้ว ต่างก็มีลักษณะ สัณฐานของความต่างระดับและระยะทางแนวราบเช่นกัน ดังนั้นองค์ประกอบนี้จึงควร ได้ชื่อว่า องค์ประกอบของความลาดชันลุ่มน้ำ (Valley slope factor)

องค์ประกอบที่ 3 เป็นองค์ประกอบเดียวที่มีลักษณะเป็น Bipolar กล่าวคือ ภายในองค์ประกอบ มีน้ำหนักองค์ประกอบของตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในทางลบ

และทางบวก ต่างจากองค์ประกอบอื่นที่เป็น Unipolar มิติหรือตัวแปรที่มีค่าน้ำหนัก องค์ประกอบสูงอย่างมีนัยสำคัญใดแก่ ตัวแปรดังต่อไปนี้

ขอบเขตคูกน้ำ	น้ำหนักองค์ประกอบ	.72134
ช่วงยาวคูกน้ำ	น้ำหนักองค์ประกอบ	.64915
มุมร่อนน้ำโค้ง	น้ำหนักองค์ประกอบ	-.40330

จะเห็นว่าองค์ประกอบที่ 3 นั้น ประกอบด้วยลักษณะและธรรมชาติของธรณีสัณฐานที่มี ผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกในลุ่มน้ำซี ดังต่อไปนี้คือ ขอบเขตคูกน้ำ ช่วงยาว คูกน้ำและมุมร่อนน้ำโค้ง เป็นที่น่าสังเกตว่า ทั้งขอบเขตคูกน้ำและมุมร่อนน้ำโค้งยังเป็น ตัวประกอบรวมในองค์ประกอบที่ 1 ด้วย เมื่อพิจารณาถึงธรรมชาติของมิติทางธรณีสัณฐาน ของตัวแปรดังกล่าว จะพบว่าเป็นลักษณะของโครงสร้างคูกน้ำ (Meander structure) โดยเฉพาะขอบเขตคูกน้ำ มีลักษณะของมิติและทิศทางทำนองเดียวกับช่วงกว้างคูกน้ำ (Meander amplitude) แล้วยังรวมเอาลักษณะความสูงร่อนน้ำโค้ง (height channel arc) ซึ่งมีรูปแบบหรือสัณฐานคล้ายกับรัศมีมีความโค้งที่เป็นมิติหนึ่งของคูกน้ำ รวมทั้งมุมร่อนน้ำโค้งก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดขนาดของรัศมีมีความโค้ง (radius of curvature) ดังนั้นองค์ประกอบนี้จึงควรได้ชื่อว่า องค์ประกอบของมิติโครงสร้าง คูกน้ำ (Meander dimension factor)

องค์ประกอบที่ 4 มิติหรือตัวประกอบที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอย่างมี นัยสำคัญทางบวกสูงมากเพียงตัวประกอบเดียวคือ ความกว้างลุ่มน้ำ ค่าน้ำหนัก องค์ประกอบ .92419 ส่วนตัวแปรหรือมิติทางธรณีสัณฐานอื่น ๆ ค่าน้ำหนักองค์ประกอบ เป็น .0 หรือมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอย่างไม่มีนัยสำคัญ และช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก ก็มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบเพียง .35202 เกือบถึงระดับนัยสำคัญตามทฤษฎีของ .400 ดังนั้น ความกว้างลุ่มน้ำ (V_w) จึงเป็นลักษณะและธรรมชาติทางธรณีสัณฐานหนึ่ง ที่มี ผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก ดังนั้นองค์ประกอบนี้ควรจะได้ชื่อว่า องค์ประกอบความกว้าง- ลุ่มน้ำ (Valley width factor)

องค์ประกอบที่ 5 ตัวแปรหรือตัวประกอบที่มีน้ำหนักองค์ประกอบอย่างน้อย 1 ทางลบ มีเพียงตัวประกอบเดียวคือ ระยะห่างของทะเลสาบ (Oxbow Lake distance) คำนวณน้ำหนักองค์ประกอบ -0.78137 และตัวประกอบอื่น ที่ใกล้เคียงกับค่านี้สำคัญ ได้แก่ มุมร่องน้ำโค้ง มีน้ำหนักองค์ประกอบ $.32366$ และช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก น้ำหนักองค์ประกอบ $.26913$ ส่วนตัวแปรหรือมิติทางธรณีสัณฐานอื่นที่มีน้ำหนักองค์ประกอบเป็น $.0$ หรือมีน้ำหนักองค์ประกอบต่ำจนไม่มีนัยสำคัญ ฉะนั้นระยะห่างของทะเลสาบจึงเป็นมิติหนึ่งทางธรณีสัณฐาน ที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกร่วมกับมิติทางธรณีสัณฐานอื่น ๆ เมื่อพิจารณาธรรมชาติของระยะห่างทะเลสาบประกอบกับธรรมชาติของตัวแปรที่มีน้ำหนักองค์ประกอบใกล้เคียงระดับนัยสำคัญ พบว่า ลักษณะธรรมชาติของตัวประกอบเหล่านี้ ต่างก็สัมพันธ์กับรูปลักษณะของร่องน้ำที่แปรผันตามระยะทางไปสู่แกนกลางลุ่มน้ำ ดังนั้นจึงควรเรียกองค์ประกอบนี้ว่า องค์ประกอบของระยะห่างแกนกลางลุ่มน้ำ (Axis of Valley distance factor)

ฉะนั้นผลของการวิจัยที่ค้นพบ ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อหาน้ำหนักองค์ประกอบของมิติทางธรณีสัณฐานหรือตัวแปรต่าง ๆ ทั้ง 12 ตัว ตามที่เสนอผลการวิเคราะห์มานี้ มีเหตุผลพอเพียงที่จะรองรับว่าเป็นไปตามสมมติฐานการวิจัยข้อ 3 ที่ตั้งไว้ว่า "องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก มีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ"

4. การสร้างสมการพยากรณ์ลักษณะทางธรณีสัณฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแอก

ผลการวิเคราะห์นี้ ต้องการให้เป็นไปตามจุดหมายของการวิจัยข้อ 3 ที่ว่า "เพื่อสร้างสมการพยากรณ์ ลักษณะทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก" จึงวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) หรือหาค่าน้ำหนักคะแนน (The score weight) ของมิติทางธรณีสัณฐาน หรือตัวทำนายทั้ง 12 ตัว จะส่งผลต่อตัวเกณฑ์ คือ ลักษณะธรณีสัณฐานที่

เกิดทะเลสาบรูปแอก มีน้ำหนักในการทำนายมากน้อยต่างกันอย่างไร เพื่อใช้ในการ
สร้างสมการถดถอยสหสัมพันธ์พหุคูณ (multiple regression equation) ในรูป
คะแนนดิบ ด้วยการเลือกเอา ความคลาชันระหว่างทะเลสาบเป็นตัวเกณฑ์ แล้ว
คำนวณหา สหสัมพันธ์พหุคูณ (multiple correlation coefficient) สัมประสิทธิ์
ถดถอย (regression coefficient) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์
(standard error of estimate) และค่าคงที่ในการพยากรณ์ (constant or
intercept) ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ปรากฏผลดังตาราง 3 ในภาคผนวก
การสร้างสมการทำนายลักษณะทางธรณีสัณฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแอก มี
สมการพยากรณ์ในรูปคะแนนดิบ เพียงสมการเดียว ดังนี้

สมการพยากรณ์ลักษณะธรณีสัณฐาน

$$\begin{aligned} \bar{O}_{os} = & 3.5186 Ol - .2166 Vw + .2008 Mb \\ & + .11494 Vs + .1104 Ml + .0268 Od \\ & + .0742 St - .0554 Oi - .0184 So \\ & + .0208 Rc - .4658 Ag + 527.749 \end{aligned}$$

ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ = 557.035

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล วัฏจักรแห่งการศึกษารอบของลุ่มน้ำชี และองค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก สามารถที่จะกล่าวสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

สรุปผลการศึกษาค้นคว้า

1. วัฏจักรแห่งการศึกษารอบของพัฒนาการลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแอก อยู่ในขั้นตอนปลายหรือขั้นปัจฉิมวัย (Old Age stage) เพราะยังเหลือพื้นที่ไม่ถูกกัดกร่อนพัดพาไป 5.1044% ในขณะที่มวลได้ถูกกัดกร่อนไปแล้ว 94.8956% นั่นคือ การเกิดทะเลสาบรูปแอก เกิดขึ้นในลักษณะภูมิประเทศที่อยู่ในขั้นปัจฉิมวัย หรือขั้นตอนปลายของวัฏจักรแห่งการพัฒนาภูมิประเทศ ตามทฤษฎีของเดวิส (Davis) ตรงกับสมมุติฐานข้อ 1

2. มิติทางธรณีสัณฐานของทะเลสาบรูปแอกทั้ง 12 มิติ ไม่ได้เป็นองค์ประกอบรวม ที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกร่วมกันทุกมิติ จากการวิเคราะห์ทางสถิติมิติทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกรวมนั้นมี 10 มิติ ได้แก่ มุมร่องน้ำโค้ง (Ag) ความลาดชันด้านข้างของลุ่มน้ำ (Vs) ความกว้างลุ่มน้ำ (Vw) ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอก (Os) ความแคบเขี้ยวลุ่มน้ำ (St) ขอบเขตกึ่งน้ำ (Mb) ช่วงยาวกึ่งน้ำ (ML) รัศมีความโค้ง (Rc) ระดับของทะเลสาบ (Ol) และระยะห่างของทะเลสาบ (Od) ส่วนมิติที่ไม่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกมี 2 มิติ ได้แก่ คุณลักษณะดิน (So) และช่วงระยะทะเลสาบ (Or) ผลการศึกษานี้ไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานข้อ 2

3. องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดทะเลสาบรูปแฉกในลุ่มน้ำที่มี 5 องค์ประกอบ ดังนี้

1. องค์ประกอบแห่งความคดโค้งร่องน้ำ (Channel arc factor) ประกอบด้วยมิติทางธรณีสัณฐานที่มีนัยสำคัญทางสถิติดังนี้ มุมร่องน้ำโค้ง (A_g) ความคดโค้งลำน้ำ (S_t) ขอบเขตกึ่งน้ำ (M_b) และรัศมีความโค้ง (R_c)
2. องค์ประกอบความลาดชันลุ่มน้ำ (Valley slope factor) ประกอบด้วยมิติทางธรณีสัณฐานที่มีนัยสำคัญทางสถิติดังนี้ ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแฉก (O_s) ระบายของทะเลสาบรูปแฉก (O_l) และความลาดชันด้านข้างลุ่มน้ำ (V_s)
3. องค์ประกอบมิติโค้งงอของลำน้ำ (Meander dimension factor) ประกอบด้วยมิติทางธรณีสัณฐานที่มีนัยสำคัญดังนี้ ขอบเขตกึ่งน้ำ (M_b) ขวงยาวกึ่งน้ำ (M_l) และมุมร่องน้ำโค้ง (A_g)
4. องค์ประกอบความกว้างลุ่มน้ำ (Valley width factor) ประกอบด้วยมิติทางธรณีสัณฐานที่มีนัยสำคัญเพียงมิติเดียวคือ ความกว้างลุ่มน้ำ (V_w)
5. องค์ประกอบระยะห่างจากแกนกลางลุ่มน้ำ (Axis of Valley Distance factor) ประกอบด้วยมิติทางธรณีสัณฐานที่มีนัยสำคัญเพียงมิติเดียว คือ ระยะห่างของทะเลสาบรูปแฉก (O_d)
6. สมการพยากรณ์ลักษณะทางธรณีสัณฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแฉก คือ

$$O_{os} = 3.51362 O_l - .29602 V_w + .20032 M_b + .11494 V_s + .11039 M_l + .02683 O_d + .07418 S_t - .05545 O_l - .01835 S_o + .02079 R_c - .46080 A_g + 527.74976$$

อภิปรายผลการศึกษาค้นคว้า

ผลการวิเคราะห์มิติทางธรณีสัณฐาน ที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแฉก และลักษณะวัฏจักรพัฒนาการ ของภูมิประเทศลุ่มน้ำชี สามารถนำมาอภิปรายผลการศึกษาค้นคว้าได้ 4 ตอน

ดังนี้

1. วัฏจักรแห่งการสักร่อนของพัฒนาการ ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแฉก

2. มีทิศทางธรณีสัณฐานที่เป็นองค์ประกอบร่วมของการเกิดทะเลสาบรูปแฉก
3. องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแฉก
4. สมการพยากรณ์ลักษณะทางธรณีสัณฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแฉก

1. วัฏจักรแห่งการสักร่อนของพัฒนาการ ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแฉก

การหาลักษณะการแจกกระจายพื้นที่ผิว ของลุ่มน้ำด้วยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพื้นที่ต่ออัตราส่วนของความสูง เพื่อทราบลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแฉก มีลักษณะอย่างไร ด้วยการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวพิพที่หลุดจากการถูกกัดกร่อนชะล้างพังทลาย จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดทะเลสาบรูปแฉกได้ นั้นต้องอยู่ในขั้นพัฒนาตอนปลายของ วัฏจักรแห่งการสักร่อนหรืออยู่ในขั้นปัจฉิมวัย ทั้งนี้เพราะยังเหลือพื้นที่ผิว (ground surface area) ที่ไม่ถูกกัดกร่อนเพียง 5.1044% ในขณะที่มวลสารส่วนใหญ่ได้ถูกกัดเซาะพังทลายและถูกพัดพาขนย้าย ด้วยกระบวนการถูกรัด (denudation processes) ไป 94.8956% จนเกือบถึงระดับฐานของการพังทลาย (Local base level) ลักษณะภูมิประเทศทั่วไปจึงเกือบถึงลักษณะราบเรียบ (Almost plain) หรือลักษณะที่เรียกว่าที่ราบในอุดมคติ (Peneplain) ซึ่งเป็นภูมิประเทศขั้นปัจฉิมวัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์หาการแจกกระจายพื้นที่ผิวพื้นที่ตลอดลุ่มน้ำ ด้วยการวิเคราะห์ฮิพโซเมตริก (Hypsometric Analysis) ก็พบว่า มวลสารได้ถูกกัดกร่อนและพัดพาขนย้ายไป 87.450% ขณะที่ปัจจุบันยังเหลือพื้นที่พิพที่ไม่ถูกกัดกร่อนพังทลายเพียง 12.5494% สตราเลอร์ (Strahler) ถือว่าเป็นลักษณะ Monadnock Phase ของลักษณะภูมิประเทศในขั้นตอนปลาย บัชนิมวัยหรือขั้นปัจฉิมวัย (Late mature and Old stage) (Strahler, 1952 : 1129)

อย่างไรก็ตามสภาพลุ่มน้ำชี มีปรากฏการณ์ทางภูมิประเทศ (evidence topography) ที่เป็นซากร่องรอย (remnant) ให้เห็นสภาพเดิมของภูมิประเทศ ซึ่งเป็นผล (product) จากการกระทำของขบวนการเสริมสร้างสัณฐานพื้นพิภพ (Process of Landsculture) ตลอดช่วงระยะเวลาทางธรณีวิทยาที่ผ่านมา แต่ทั้งนี้ จะต้องยอมรับการยกตัวของพื้นพิภพเหนือระดับน้ำทะเลโดยการแทรกดันของหินแกรนิต (granite) ในยุคไทรแอสสิก (Triassic) ถึงครีเตเชียส (Cretaceous) และการกาเนิดที่ราบสูงโคราชระหว่างตอนปลายยุคเทอร์เชียรี (Tertiary) ควบคู่การยกตัวเป็น Table - land พื้นราบลาดเอียงไปทางตะวันออกเล็กน้อย ลักษณะภูมิประเทศลุ่มน้ำชีจึงได้รับการพัฒนาจากขบวนการสร้างสัณฐานภายนอก (Exogenetic processes) หลาย ๆ ขบวนการ เพื่อลดระดับและปรับระดับเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ (state of equilibrium) โดยเฉพาะตัวการสำคัญ คือ Fluvial Processes ที่เริ่มการกัดเซาะพร้อม ๆ กับการยกตัวของพื้นดิน ทำให้เกิดการพัฒนาเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศเป็นลำดับขั้น (Consequent) จนถึงขั้นตอนปลายของการพัฒนา มีปรากฏการณ์ของภูมิประเทศเป็นลักษณะโครงสร้างภายนอก (External structure) ที่น่าสังเกตและเป็นหลักฐานดังนี้

1. ซากทิวร่องรอย (remnant) ลักษณะภูมิประเทศเดิม เมื่อพิจารณาลักษณะภูมิประเทศของลุ่มน้ำชี จากแผนที่และภาพถ่ายทางอากาศ ตลอดทั้งการศึกษาภาคสนามในหลายแห่ง พบว่า ลักษณะโดยทั่วไปทางตะวันตกและบริเวณตอนต้นของลุ่มน้ำชี มีภูเขาโดด (Monadnock) รูปทรงสัณฐานคล้ายกัน กล่าวคือ มีลักษณะเป็น Mesa ที่มีหน้าผาชัน เป็นส่วนที่เหลือจากการกระทำของ Fluvial Processes โดยมีแรงน้ำไหล (Running water) เป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาภูมิประเทศ ภูเขาส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นภูเขายอดตัด (flat top hills) เช่น ภูกระดึง ภูคาน้อย ภูกระแต ภูหยวก ภูแหลมคา ภูเวียง ภูเกา ภูสระเกา ซึ่งเห็นว่าเดิมที่ลุ่มน้ำชีบริเวณนี้ จะมีลักษณะพื้นที่เป็นที่ราบสูงแบบ Table - land แต่ได้รับการกัดเซาะกัดกร่อนลดระดับด้วยขบวนการปรับระดับ (degradation process) ในรูปแบบต่าง ๆ

จึงเหลือลักษณะ ซากหรือร่องรอย (remnants) ของโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่เป็นหินทรายแข็ง (resistance) บริเวณดังกล่าวมีพื้นที่น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่รับน้ำทั้งหมด ดังตาราง 4 ที่นำเสนอจะเห็นว่า พื้นที่ระหว่างเส้นชั้นความสูง 800 - 900 เมตร เท่ากับ 660.625 ตารางกิโลเมตร และ 900 - 1000 เมตร เท่ากับ 698.375 เมตร มากกว่าพื้นที่ระหว่าง 700 - 800 เมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ชันของภูเขา ทั้งนี้เพราะเป็นลักษณะเขาขดคด ลักษณะดังกล่าวจะสอดคล้องกับการศึกษาของ สตราเลอร์ (Strahler) ที่ศึกษา วัฏจักรการสึกกร่อนของที่ราบต่ำในแอ่งระบายน้ำทางตอนเหนือของอะลาบามา (Alabama) พบว่า ยังเหลือพื้นดินจากการกัดกร่อน 17.6% ลักษณะเด่นคือ hypsometric จะโค้งเว้ามากเพราะมีภูเขาโดด (Monadnock)* ของหินทรายที่พื้นผิวด้าน (Strahler, 1952 : 1130)

2. พื้นที่ราบน้ำท่วมถึง (flood plain) ลักษณะพื้นที่ราบน้ำท่วมถึงบริเวณที่เกิดทะเลสาบรูปแอกกว้างเว้ากว้างมาก ก็จะเห็นได้จากลักษณะเส้นชั้นความสูงบริเวณลุ่มน้ำทางกันมาก ช่วงบริเวณฝั่งซ้ายของแม่น้ำจีนถึงสันปันน้ำกับลำน้ำขาว ไม่มีเส้นชั้นความสูง จนกระทั่งถึงสันปันน้ำจึงปรากฏเส้นชั้นความสูงเป็นหย่อมเล็ก ๆ ความต่างระดับระหว่างที่ซึ่งทะเลสาบรูปแอกกับสันปันน้ำที่อยู่ฝั่งเดียวกัน ตลอดทั้งบริเวณที่ศึกษาไม่มีทะเลสาบใดอยู่ต่ำกว่าระดับสันปันน้ำเกินกว่า 60 เมตร กล่าวคือสูงสุด 58.5 เมตร ที่ภูเขเวียน และที่บึงสองชั้นอยู่ต่ำกว่าสันปันน้ำเพียง 4 เมตร โดยเฉลี่ยแล้วสันปันน้ำสูงกว่าที่ซึ่งทะเลสาบเพียง 21.877 เมตร เมื่อพิจารณาความกว้างของลุ่มน้ำตัดตามขวางกว้างเฉลี่ย 42.078 กิโลเมตร ในขณะที่ขอบเขตคูก้นน้ำกว้างเฉลี่ย 1.041 กิโลเมตร ระยะทางของทะเลสาบกับแกนกลางลุ่มน้ำสูงสุด 6.095 กิโลเมตร และเฉลี่ย 2.005 กิโลเมตร แสดงว่าพื้นล่างลุ่มน้ำชี (Valley floor) ในบริเวณนี้เป็นที่ราบน้ำท่วมถึงกว้างใหญ่กว่าความกว้างขอบเขตคูก้นน้ำ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งของลักษณะภูมิประเทศขั้นปัจฉิมวัย อีกประการหนึ่งสังเกตได้จากการสร้างเขื่อนคันกันของกรมชลประทาน เพื่อป้องกันน้ำท่วม เริ่มตั้งแต่เขตเทศบาลเมืองมหาสารคามไปตามลำน้ำ ผ่านเขตอำเภอรอยเอ็ด จนถึงเขตอำเภอสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด

(แผนภูมิประเทศ 1 : 50000 : 5641 II, 5741 III)

3. พัฒนาการของลำน้ำสาขา (river branches) เมื่อพิจารณา รูปแบบการระบายน้ำ (Drainage pattern) ของลุ่มน้ำชี จะเห็นว่าลำน้ำสาขาของแม่น้ำชีมีน้อยสาย โดยเฉพาะทางก้นผืนหุบเขา สาขาสำคัญจะไหลลงทางฝั่งซ้าย เป็นต้นว่า ลำน้ำพรม ลำน้ำเชิญ ลำน้ำพอง ลำน้ำปาว และลำน้ำยัง ที่เป็นเช่นนี้ เพราะพัฒนาการตามลำดับของลำน้ำ (Consequent stream) ที่กัดเซาะภูมิประเทศ ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายสันปันน้ำ ระบบสันปันน้ำย่อย (system of subdivide) จะถูกกัดเซาะพังทะลายหายไป เกิดแอ่งระบายน้ำร่วมที่ขยายใหญ่ขึ้น จำนวนลำน้ำสาขาจึงลดลง ธอร์นเบอร์รี่ (Thornburry) ให้ความเห็นว่า การกัดเซาะพังทะลายของลำน้ำ เป็นขบวนการเพิ่มขยายความกว้างลุ่มน้ำและลดพื้นที่ระหว่างลำน้ำ (Interstream) ลงจนเกิดระบบระบายน้ำร่วมกัน ทำให้ลำน้ำสาขาลดลง นั่นคือ จะเข้าไปสู่สภาวะการไหลบ่าพื้นผิว หรือการไหลเป็นแผ่น (sheet erosion) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของลักษณะภูมิประเทศขั้นตอนปลายวัฏจักร (Thornburry, 1969 : 135)

4. ลักษณะสันฐานร่องน้ำ จากแผนที่ตลอดลุ่มน้ำชีโดยเฉพาะบริเวณที่เกิดทะเลสาบรูปแอก พบว่า การพัฒนาของลำน้ำเป็นคูก้นน้ำอย่างเด่นชัด ดังจะเห็นได้จากมิติของโครงสร้างคูก้นน้ำที่วัดได้ตามแหล่งเกิดทะเลสาบรูปแอกแต่ละแห่ง เป็นต้นว่าที่ กุดอ้อใหญ่ มีขอบเขตคูก้นน้ำกว้างถึง 2.125 กิโลเมตร โดยเฉลี่ยขอบเขตคูก้นน้ำกว้าง 1.041 กิโลเมตร และช่วงยาวคูก้นน้ำเฉลี่ย 1.391 กิโลเมตร รัศมีความโค้งเฉลี่ย 267.598 เมตร มุมร่องน้ำโค้งเฉลี่ย 71.360 องศา และความคดเคี้ยวลำน้ำบริเวณนี้ เฉลี่ย 2.018 แสดงว่า แม่น้ำชีบริเวณที่ศึกษา เป็นลำน้ำคดเคี้ยวอย่างแท้จริง เพราะความคดเคี้ยวมากกว่า 1.5 ซึ่งมากกว่าแม่น้ำเจ้าพระยาที่มีความคดเคี้ยวสูงสุดเพียง 1.99 ที่บริเวณเกาะตานิว (นงคราญ, 2519 : 4) ขณะที่แม่น้ำชีมีความคดเคี้ยวสูงสุด 3.30 ที่บริเวณหนองเขาวัวและกุดโง้ง การที่ลักษณะลำน้ำชีมีมิติโครงสร้างคูก้นน้ำสูง แสดงว่าการกัดเซาะในแนวคิ่งไกลจะสิ้นสุดลง แม่น้ำจึงกัดเซาะด้านข้าง (Lateral

erosion) และเริ่มไหลแกว่งตัวมากยิ่งขึ้นจึงทำให้ลำน้ำคเคี้ยว ซึ่งซอว์กิน (Sawkin) อธิบายว่า ลักษณะความลาดชันที่แม่น้ำไหลผ่าน การเปลี่ยนแปลงของตะกอนน้ำพา, หินพื้นฐาน การไหลสายและแรงหนีศูนย์กลางเป็นสาเหตุทำให้ลำน้ำคเคี้ยว พัฒนาการดังกล่าวนี้จะเห็นอย่างชัดเจนในขั้นตอนปลายวัฏจักรของพัฒนาการลักษณะภูมิประเทศ เพราะลำน้ำมีอิสระที่จะเคลื่อนย้ายไปทั่วพื้นลุ่มน้ำที่กว้างใหญ่ (Sawkin, 1974 : 183)

5. ลักษณะความลาดชัน จากการรวบรวมข้อมูลบริเวณที่เกิดทะเลสาบรูปแอก มีความลาดชันน้อยมาก ดังเช่นความลาดชันระหว่างทะเลสาบหนึ่งไปสู่ทะเลสาบหนึ่ง โดยเฉลี่ยทั่วท้องบริเวณเพียง .08698% หรือ .0008798 และความลาดชันด้านข้างลุ่มน้ำ .08739% หรือ .0008739 จะเห็นว่าพื้นที่เกือบราบเรียบ (Almost plain) หากอยู่ใกล้ระดับน้ำทะเล ลักษณะภูมิประเทศเช่นนี้อาจเป็นที่ราบในอุดมคติ (Peneplain) ได้ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางภูมิประเทศขั้นปัจฉิมวัย ชื่อน่าสังเกตลักษณะแม่น้ำซึ่งที่ศึกษามีความลาดชันน้อยมาก ทั้งภาพตัดตามยาวและตัดตามขวาง ทั้งนี้อาจเพราะลำน้ำได้กักเซาะถึงระดับฐานของการพังทลาย โดยมีระดับฐานการพังทลายท้องถิ่น (Local base level) เป็นตัวกำหนด กล่าวคือ แนวสันปันน้ำระหว่างลุ่มน้ำป่ากับลุ่มน้ำวัง ที่ทอดยาวมาจากทิวเขาภูพาน โดยเฉพาะตรงกลางแนวสันปันน้ำนี้จะมีภูเขาไม่เปาะ เป็นภูเขาโดดหินทรายสูง 365 เมตร แล้วทอดแนวการยกตัวผ่านลุ่มน้ำซึ่งตรงบริเวณตอนใต้ลำน้ำป่าลงไหลบรรจบแม่น้ำชี จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นแนวระดับฐานการพังทลายท้องถิ่น ทั้งนี้เพราะใต้บริเวณนี้ลงไปตามลำน้ำตอนล่าง ลำน้ำชีกลับมีความคเคี้ยวและจำนวนทะเลสาบรูปแอกลดลง ทั้งที่มีระดับต่ำกว่า ในขณะที่เดียวกันทิศทางการไหลของลำน้ำชีจะเปลี่ยนจากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันออกเฉียงใต้ก่อนไปสู่ทิศใต้ลงสู่แม่น้ำมูลอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นได้อย่างเด่นชัดว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างธรณีวิทยาระหว่างช่วงที่ศึกษาทะเลสาบรูปแอกกับลำน้ำตอนล่างลงไป

จากเหตุผลดังกล่าว พอที่จะสรุปได้ว่า ลักษณะภูมิประเทศลุ่มน้ำชี โดยเฉพาะบริเวณที่เกิดทะเลสาบอยู่ในขั้นตอนปลายของวัฏจักรการสึกกร่อน ซึ่งสนับสนุนการจำแนก

ลำดับการเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศของเรส (Raize) ที่กำหนดไว้ว่า ลักษณะภูมิประเทศชั้นปัจฉิมวัย เป็นที่ราบน้ำท่วมถึงกว้างใหญ่ พัฒนาการของคูกน้ำเป็นไปอย่างอิสระจนเกิดทะเลสาบรูปแอก มีที่ราบดินตะกอนและคันกินธรรมชาติปรากฏเด่นชัด (Strahler, 1969 : 445) และตรงกับกรจำแนกลักษณะภูมิประเทศของ ธอร์นเบอร์รี่ (Thornbury) ที่กล่าวว่า ภูมิประเทศชั้นปัจฉิมวัย ลักษณะลุ่มน้ำกว้างเว้งกว้างที่สุด ความลาดชันน้อยมาก โดยเฉพาะความกว้างลุ่มน้ำ จะมากกว่าความกว้างขอบเขตคูกน้ำ พื้นที่ส่วนใหญ่เกิดการชะล้างตะกอนผิวหน้า ความสูงต่ำของพื้นผิวใกล้เคียงระดับฐานการพังทลาย (Thornbury, 1969 : 135)

ผลจากการศึกษาครั้งนี้ เป็นการพิสูจน์และสามารถให้ข้อยุติได้ทางหนึ่งว่าทฤษฎีวัฏจักรการสึกกร่อนทางธรณีสัณฐานของ เดวิส (Davis) เป็นจริง ซึ่งตรงกับการศึกษากระษัยจักรลักษณะภูมิประเทศลำเขกในลุ่มน้ำมูล ที่ บพิตร ศึกษาไว้ (บพิตร, 2517 : 67) นอกจากนี้ยังเป็นข้อพิสูจน์ได้อย่างแจ่มชัดว่า ลักษณะภูมิประเทศของภาคตะวันออกเฉียงเหนือไม่ได้เป็นที่ราบสูงคังที่คนทั่วไปเข้าใจ หากแต่เป็นที่ราบเรียบจนเกือบเป็น Penoplain ประกอบกับซากร่องรอย (remnant) ภูมิประเทศเดิม ปรากฏทั่วไปทางคานตะวันตกของลุ่มน้ำ ตามแนวโก่งตัวอินโดจีนีเยน (Indosinian fold belt) ดังนั้น การบกทัวขงลุ่มน้ำหรือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือน่าจะยกตัวเฉพาะบริเวณที่พบซากหรือร่องรอยเดิมเท่านั้น กล่าวคือ คานตะวันตกของภาค, ตามริมขอบและเทือกเขาภูพาน

ที่น้าสังเกตอีกประการหนึ่ง คือลักษณะความลาดชันของลุ่มน้ำขีบริเวณเกิดทะเลสาบพบว่า ความลาดชันทั้งภาพตัดค้ำขวางและตัดตามยาวน้อยมาก รวมทั้งความสูงค่างระหว่างที่ตั้งทะเลสาบ ซึ่งอยู่ในระดับใกล้เคียงกับร่องน้ำปัจจุบันไปยังสันปันน้ำสูงค่างกันโดยเฉลี่ยเพียง 21.877 เมตร น้าที่จะเป็นข้อมูลพื้นฐานของการพัฒนาชลประทานควยระบบทอส่งน้ำไปยังพื้นที่เกษตรกรรมสองฝากฝั่งลำน้าที่ว่างเปล่าในหน้าแล้ง เพื่อเพิ่มผลผลิตและแก้ปัญหาขาดแคลนน้า โดยเฉพาะเป็นการใช้ปริบำนน้ำท่าของแม่น้ำขีเพิ่มขึ้น แทนการปล่อยให้ไหลระบายไปหมด

2. มิติทางธรณีสัณฐานที่เป็นองค์ประกอบร่วมของการเกิดทะเลสาบรูปแอก

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ พบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในระหว่างมิติทางธรณีสัณฐาน ที่ได้มาโดยการวัดจากแผนที่บริเวณที่เกิดทะเลสาบรูปแอก มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นตรงไม่สูงมากนัก โดยเฉพาะสหสัมพันธ์ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติมีถึง 50 คู่ แสดงว่ามิติทางธรณีสัณฐานทั้ง 12 มิติ มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันเป็นเส้นตรงไม่ชัดเจนที่น่าสังเกตคือ ระยะห่างของทะเลสาบ คุณลักษณะดิน ช่วงระยะทะเลสาบ ความลาดชันด้านข้างและรัศมีความโค้ง มีค่าสหสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นต่ำกว่ามากกว่า 7 ตัวแปร จึงทำให้สงสัยว่ามิติทางธรณีสัณฐานดังกล่าว อาจไม่เป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอกร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า คุณลักษณะดิน ช่วงระยะทะเลสาบ ความลาดชันด้านข้างลุ่มน้ำ และรัศมีความโค้ง มีน้ำหนักองค์ประกอบหรือสัมประสิทธิ์โครงสร้าง ในแต่ละองค์ประกอบต่ำ และค่า Communality ของตัวแปรกลุ่มนี้ต่ำอย่างมากไม่มีนัยสำคัญ กล่าวคือ Communality ของคุณลักษณะดิน ช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก ความลาดชันด้านข้างลุ่มน้ำ และรัศมีความโค้ง เท่ากับ .1193, .2742, .2772 และ .2481 ตามลำดับ ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า Unique factor ซึ่งเป็นค่าที่ชี้ให้เห็นว่าตัวแปรหรือมิติดังนั้น ๆ เป็นตัวของตัวเอง หรือมีเอกลักษณ์เฉพาะตนมากน้อยเพียงใดนั้น พบว่า ตัวแปรเหล่านี้มีค่า Unique factor สูง ดังเช่น คุณลักษณะดินเท่ากับ .9334 รัศมีความโค้ง .8670 ช่วงระยะทะเลสาบ .8519 และความลาดชันด้านข้างลุ่มน้ำ .8502 แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ ต่ำ นั่นคือ ส่งผลรวมหรือเป็นองค์ประกอบร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ น้อย ฉะนั้นข้อสงสัยตอนต้นน่าจะจริง แต่เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักองค์ประกอบภายหลังการหมุนแกนพบว่า ตัวแปรที่มีน้ำหนักองค์ประกอบต่ำอย่างไม่มีนัยสำคัญได้แก่ คุณลักษณะดินและช่วงระยะทะเลสาบ แสดงว่า ตัวแปรทั้งสองไม่ได้เป็นองค์ประกอบร่วม ที่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบจริง และเมื่อดูจากกราฟแสดงตำแหน่งของตัวแปรต่าง ๆ บนมิติทุกองค์ประกอบ ก็ จะเห็นการจับกลุ่มของตัวแปรที่ส่งผลและไม่ส่งผลต่อทะเลสาบอย่างเด่นชัด ผลการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถที่จะอธิบายด้วย

เหตุผลทางภูมิศาสตร์ ดังนี้

เหตุที่คุณลักษณะดินไม่ใช่ปัจจัยสำคัญ ที่กำหนดการเกิดทะเลสาบรูปแอก ย่อมชี้ให้เห็นว่า การเกิดทะเลสาบรูปแอกอยู่ที่ลักษณะธรณีสัณฐานอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับ รูปทรงลุ่มน้ำ กล่าวคือ สัณฐานลุ่มน้ำ (Basin morphometric) และสัณฐานลำน้ำ (Stream morphometric) ซึ่งเป็นตัวแปรลักษณะพื้นผิว (Surficial variables) ตัวแปรต่าง ๆ ดังกล่าวนี้นี้ มีความสัมพันธ์กันโดยธรรมชาติอยู่แล้ว ดังเช่น นุ่มรอง น้ำโค้ง ความคดเคี้ยวลำน้ำ ขอบเขตคูกน้ำ ช่วงยาวคูกน้ำและรัศมีความโค้ง จะ พัฒนาได้ขึ้นอยู่กับ ความลาดชันด้านข้างลุ่มน้ำ ความกว้างลุ่มน้ำ และความลาดชัน ระหว่างทะเลสาบ ฉะนั้นจึงพบว่า มีทะเลสาบรูปแอกอยู่ตามลุ่มน้ำต่าง ๆ ทั่วไป ทั้งที่ลุ่มน้ำเหล่านั้นมีลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาและคุณลักษณะดินแตกต่างกัน แสดงว่า ลุ่มน้ำต่าง ๆ เหล่านี้มีลักษณะธรณีสัณฐานคล้ายกัน ผลการศึกษาครั้งนี้ตรงกับการศึกษา ธรรมชาติคูกน้ำ (Meander habit) ของ ตัน (David Ton) ที่กล่าวถึงปัญหา สำคัญที่จะต้องศึกษาเกี่ยวกับลักษณะคูกน้ำและทะเลสาบรูปแอกว่า สิ่งที่ควรพิจารณา อันคืบแรก คือหน้าที่หรือรูปการ (aspect) ทางเรขาคณิตของภูมิประเทศกับมิติของน้ำ (Ton, 1972 : 210) นอกจากนี้ยังสนับสนุนและสอดคล้องกับการศึกษาของ ฟรายด์คิน (Friedkin) แฮนดี้ (Handy) เมลตัน (Melton) ลีโอโพลด์ (Leopold) ฮิกกิน (Hickin) และ ฟลินท์ (Flint) อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะดิน ได้ใช้เปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบที่เป็นซิลต์ (silt) และเป็นมิติทาง ธรณีสัณฐานมิติเดียวเท่านั้นที่ไม่อยู่ในรูปเรขาคณิต ประกอบการศึกษาครั้งนี้ไม่มีตัวแปร ทาง hydraulic จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้คุณลักษณะดินไม่วัดรวมหรือเป็น องค์ประกอบร่วมกับตัวแปรทางเรขาคณิตอื่น ๆ

ส่วนช่วงระยะทะเลสาบรูปแอก (Oxbow - Lake Interval) ซึ่งเป็น ลักษณะโครงสร้างภายนอก (external structure) ของทะเลสาบรูปแอก ที่ได้ จากอัตราส่วนของระยะทางระหว่างปลายบนทะเลสาบรูปแอกหนึ่งไปยังปลายบนของ ทะเลสาบรูปแอกที่อยู่ถัดไปตามลำน้ำตอนล่างต่อระยะทางตรงจากยอดโค้งของทะเลสาบ

รูปแอก ไปยังร่องน้ำที่ใกล้ที่สุด ซึ่งเป็นการ ศึกษาลักษณะการแจกกระจายของทะเลสาบ รูปแอกตามลำน้ำนั้น เป็นมิติทางธรณีสัณฐานที่ไม่มีอิทธิพลต่อการเกิดทะเลสาบเช่นกัน นั่นคือการเกิดทะเลสาบรูปแอกไม่มีช่วงระยะที่แน่นอน แต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นมากกว่า ดังนั้น จึงพบว่า บริเวณที่เกิดทะเลสาบรูปแอก จะมีทะเลสาบรูปแอกซ้อนเหลื่อมกันอยู่มากมาย และห่างจากลำน้ำปัจจุบันต่างกัน ทั้งนี้เพราะเป็นการเกิดทะเลสาบรูปแอกต่างวัฏจักรกัน ดังเช่น ปิงโกกับกุดหลุม, กุดเวียงกับกุดเวียงและกุดแสนชาติ, กุดโง้งกุดแปและกุดเหะ, กุดอ้อยกุดอ้อใหญ่กุดซุยแะกุดกวน, กุดเวียงกับหนองหญ้ามา, กุดอีกับกุดคำฮ้าง, กุดแดงกุดน้ำใสกุดจระเข้และกุดผักชี

3. องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก

การศึกษาหาคุณลักษณะและธรรมชาติของการเกิดทะเลสาบรูปแอกในลุ่มน้ำชี ด้วยการใช้วิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า สัมประสิทธิ์โครงสร้าง หรือสหสัมพันธ์ของตัวแปรกับองค์ประกอบในแต่ละองค์ประกอบทั้งก่อนและหลังการหมุนแกน ไม่มีองค์ประกอบใดที่มีลักษณะทางธรณีสัณฐานทั้ง 12 มิติ วัดองค์ประกอบร่วมกันอย่างเด่นชัดถึงระดับมีนัยสำคัญทุกตัว ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า ได้องค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก 5 องค์ประกอบดังนี้

1. องค์ประกอบแห่งความคดโค้งของร่องน้ำ (Channel arc factor) ตัวแปรที่มีน้ำหนักองค์ประกอบหรือสัมประสิทธิ์โครงสร้างสูงคิเล็ด คีมาก คี และปานกลาง เรียงตามลำดับดังนี้ มุมร่องน้ำโค้ง เท่ากับ .73019 ความคดเคี้ยวลำน้ำเท่ากับ .61388 ขอบเขตคูกน้ำเท่ากับ .58446 และรัศมีความโค้งเท่ากับ .49506 แสดงว่า ตัวแปรหรือมิติเหล่านี้มีลักษณะเหมือนกับองค์ประกอบ หรือค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับองค์ประกอบเป็นค่าของโครงสร้างองค์ประกอบมากกว่าแบบแผนขององค์ประกอบนั่นเอง สัมประสิทธิ์โครงสร้างสูงมากเท่าใด ย่อมแสดงว่าองค์ประกอบนั้นก็ยิ่งเหมือนกับตัวแปรมากขึ้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาธรรมชาติของตัวแปรเหล่านี้ ซึ่งพยายามที่จะแสดงธรรมชาติขององค์ประกอบ ทำให้ทราบลักษณะธรรมชาติ

ขององค์ประกอบนี้ได้ จึงให้ชื่อองค์ประกอบนี้ว่า องค์ประกอบแห่งความคดโค้งของร่องน้ำ ทั้งนี้เพราะ จากธรรมชาติของมิติทางธรณีสัณฐานที่แม่น้ำหนักองค์ประกอบหรือสัมพันธ์ที่โครงสร้างสูงนั้น เป็นมิติของลำน้ำ (stream dimension) หรือเป็นลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของร่องน้ำ ซึ่งต่างก็เกี่ยวข้องกับความคดโค้งของลำน้ำ เป็นต้นว่า มุมร่องน้ำโค้ง หมายถึงค่าของมุมที่วัดได้จากแกนกลางขอบเขตลำน้ำกับ แนวร่องน้ำโค้ง (channel arc) ความคดโค้งลำน้ำ คือ อัตราส่วนระหว่างระยะทางที่วัดไปตามลำน้ำ ต่อระยะทางที่วัดไปตามแกนกลางขอบเขตลำน้ำ รัศมีความโค้ง หมายถึง ความยาวเฉลี่ยจากจุดแกนกลางหัวโค้ง (Axis of bend) ไปยังแกนกลางร่องน้ำรอบหัวโค้งลำน้ำ และ ขอบเขตลำน้ำ คือระยะทางตั้งฉากระหว่างชายฝั่งที่โค้งเว้าไปยังชายฝั่งด้านโค้งเว้าของลำน้ำถัดไป จะเห็นว่าลักษณะธรรมชาติของมิติทางธรณีสัณฐานเหล่านี้มีลักษณะความคดโค้ง หรือคดเกี่ยวร่วมกัน ซึ่งเป็นลักษณะธรรมชาติขององค์ประกอบที่ 1 นั่นคือ ความคดโค้ง ความคดเกี่ยวของร่องน้ำเป็นปัจจัยหรือเป็นองค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่สำคัญมิติหนึ่ง ที่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแฉกโดยตรง เพราะการปรับความลาดชันของลำน้ำเกิดขึ้นได้ 2 ทางคือ การกัดกร่อนและการทับถมของน้ำกับการเพิ่มความยาวด้วยการคดโค้ง เพราะว่าลำน้ำแบบคดโค้ง (Meander stream) บางช่วงระดับเกือบถึงฐานของการพังทลายไม่สามารถกัดเซาะคานลึกเพื่อเกลี่ยระดับได้ ขบวนการที่จะลดระดับลงต้องอาศัยการเพิ่มความคดเกี่ยว (Galluly, 1968 : 207) พัฒนาการของลำน้ำเพื่อเพิ่มความคดเกี่ยวเกิดจากการกัดเซาะด้านข้าง (lateral erosion) ที่สัมพันธ์กับความลึก การไหลเหวี่ยงหรือไหลส่ายของกระแสที่ปะทะฝั่งด้านหนึ่งไปสู่ฝั่งด้านหนึ่ง เมื่อความคดโค้งคดเกี่ยวของลำน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ลำน้ำจะไหลตัดคอคอดคูก้น (Meander cutoff) เกิดทะเลสาบรูปแฉกโดยเหตุผลดังกล่าวมานี้ องค์ประกอบแห่งความคดโค้งของร่องน้ำจึงเป็นลักษณะทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแฉกโดยตรง

2. องค์ประกอบความลาดชันลุ่มน้ำ (Valley slope factor)

ตัวแปรที่แม่น้ำหนักองค์ประกอบหรือสัมพันธ์ที่โครงสร้างสูงอย่างมีนัยสำคัญเรียงตาม

ลำดับดังนี้ ความลาดชันระหว่างทะเลสาบ .80054, ระดับของทะเลสาบ .76324 และความลาดชันด้านข้างลุ่มน้ำ .41706, แสดงว่า ตัวแปรเหล่านี้มีลักษณะเหมือนกับ องค์ประกอบ เมื่อพิจารณาธรรมชาติตัวแปร ซึ่งพยายามที่จะแสดงธรรมชาติของ องค์ประกอบ ทำให้ทราบลักษณะขององค์ประกอบได้ จึงให้ชื่อองค์ประกอบนี้ว่า องค์ประกอบความลาดชันลุ่มน้ำ (Valley slope factor) เพราะเหตุว่า มิติทาง ธรณีสัณฐานเหล่านี้ เป็นลักษณะธรณีสัณฐานลุ่มน้ำ (Basin morphometric) และ ลักษณะโครงสร้างภายนอกของทะเลสาบรูปแอก ซึ่งต่างก็มีลักษณะของความต่างระดับ กับระยะทางราบ เป็นต้นว่า ความลาดชันระหว่างทะเลสาบรูปแอกได้จากอัตราส่วน ของความต่างระดับระหว่างทะเลสาบรูปแอกที่อยู่ใกล้กันที่สุดตามทิศทางการไหลของ ลำน้ำต่อระยะทางราบระหว่างตัวโค้งของทะเลสาบที่หาความต่างระดับ ความลาดชัน ด้านข้างลุ่มน้ำ คืออัตราส่วนของความสูงทางตอนระยะทางแนวนอนระหว่างที่ตั้งของ ทะเลสาบรูปแอกกับแนวสันปันน้ำที่อยู่ด้านฝั่งลำน้ำเดียวกัน และระดับของทะเลสาบ รูปแอกเป็นความ ต่างระดับระหว่างที่ตั้งของทะเลสาบรูปแอกกับความสูงเฉลี่ยของ สันปันน้ำ ที่ตัดขวางลุ่มน้ำผ่านยอดโค้งทะเลสาบรูปแอกแต่ละแห่ง จะเห็นว่าลักษณะ ธรรมชาติของมิติเหล่านี้ ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบที่ 2 มีลักษณะ รวมกันคือ ความต่างระดับกับระยะทางแนวนอน โดยเฉพาะคุณลักษณะของมิติความ ลาดชันระหว่างทะเลสาบมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับลักษณะความลาดชันร่องน้ำ (gradient) นั่นคือ มิติทางธรณีสัณฐานดังกล่าว แสดงให้เห็นลักษณะความลาดชันทั้งภาพตัดตามขวาง และตัดตามยาว ด้วยเหตุนี้ จึงเรียกองค์ประกอบนี้ว่า องค์ประกอบความลาดชันลุ่มน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยกำหนดอัตราการเพิ่มความกักเก็บของร่องน้ำ กล่าวคือ ลุ่มน้ำที่มีความ ลาดชันสูง การกระทำของร่องน้ำจะกัดเซาะท้องน้ำเพื่อลดระดับสู่สภาวะสมดุล (state of equilibrium) แต่บริเวณที่ศึกษาลักษณะความลาดชันลุ่มน้ำน้อยมาก จนเกือบราบเรียบพื้นล่างลุ่มน้ำกว้างใหญ่ร่องน้ำจึงพัฒนาเพิ่มความกักเก็บ เพื่อลดระดับ เข้าสู่สภาวะสมดุลได้อย่างอิสระทั่วทั้งที่ราบน้ำท่วม ลำน้ำในช่วงนี้จึงมีความกักเก็บสูงมาก จนเกิดคอคอดคูลุ่มน้ำและทะเลสาบรูปแอกมากมาย ดังนั้นองค์ประกอบความลาดชันลุ่มน้ำ

จึงเป็นลักษณะทางธรณีสัณฐานมิติหนึ่ง ที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ ฟลินท์ (Flint) ที่กล่าวว่า การเกิดคูกน้ำจนเป็นทะเลสาบรูปแอก ไม่ได้เกิดขึ้นโดยบังเอิญ (Accident) แต่จะพัฒนาอย่างมีระบบปรากฏให้เห็นได้ ในร่องน้ำที่มีความลาดชันน้อย (gentles gradient) ในบริเวณที่รำนน้ำทั่ว โดยทั่วไป (Flint, 1974 : 133)

3. องค์ประกอบมิติโครงสร้างคูกน้ำ (Meander dimension factor)

ตัวแปรที่บ่งชี้ว่าหน้าของคูประกอบสูงอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ขอบเขตคูกน้ำ .72134 ช่วงยาวคูกน้ำ .64915, และมุมร่อนน้ำโค้ง $-.40330$, แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้มีลักษณะเหมือนกับองค์ประกอบ เมื่อพิจารณาธรรมชาติของตัวแปรดังกล่าว ซึ่งพยายามที่จะแสดงธรรมชาติขององค์ประกอบทำให้ทราบลักษณะธรรมชาติขององค์ประกอบได้ จึงเรียกองค์ประกอบนี้ว่า องค์ประกอบมิติโครงสร้างคูกน้ำ ทั้งนี้เพราะมิติทางธรณีสัณฐานที่เป็นโครงสร้างองค์ประกอบที่มีลักษณะร่วมกันเกี่ยวกับโครงสร้างของคูกน้ำ ซึ่งเป็นลักษณะธรณีสัณฐานร่อนน้ำหรือมิติร่อนน้ำอย่างหนึ่ง ดังเช่น ช่วงยาวคูกน้ำ (Meander length) เป็นมิติหนึ่งของคูกน้ำที่หมายถึง ระยะทางแนวราบระหว่างจุดเริ่มคูกน้ำ (Point of inflection) ไปยังจุดเริ่มอีกคูกน้ำหนึ่งที่อยู่ติดไป และขอบเขตคูกน้ำก็เป็นลักษณะคูกน้ำ มิติหนึ่ง นอกจากนี้ มุมร่อนน้ำโค้งมีความสัมพันธ์กับมิติคูกน้ำสูงและเป็นปัจจัยที่กำหนดขนาดของมิติคูกน้ำ เป็นต้นว่า รัศมีความโค้งช่วงยาวคูกน้ำ โดยเฉพาะขอบเขตคูกน้ำ มีลักษณะของมิติและทิศทางเช่นเดียวกับช่วงกว้างคูกน้ำ (Meander amplitude) จึงเป็นเหตุผลพอเพียงที่เรียกองค์ประกอบนี้ว่า องค์ประกอบมิติโครงสร้างคูกน้ำ การก่อตัวของคูกน้ำเนื่องมาจากการปรับตัวของร่อนน้ำ และจะขยายอย่างรวดเร็ว เมื่อลำน้ำสิ้นสุดการกัดเซาะท้องธาร พัฒนาการของคูกน้ำทำให้เกิดความกว้างของพื้นที่ระหว่างคานจัน (Meander spur) แคมลงเป็นคอคอกคูกน้ำ (Meander neck) ในที่สุดลำน้ำจะไหลตัดคอคอกกลายเป็นทะเลสาบรูปแอก (Thornburry, 1969 : 132) ดังนั้น ทะเลสาบจึงเป็นปรากฏการณ์สุดท้าย (end product) ของคูกน้ำ องค์ประกอบมิติโครงสร้างคูกน้ำจึงเป็นองค์ประกอบ

ทางธรณีสัณฐานที่มีผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก ข้อสังเกตจะเห็นว่า มิติทางธรณีสัณฐานขององค์ประกอบนี้ มี 2 มิติ ที่เป็นองค์ประกอบรวมในองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบทั้งสองต่างก็ประกอบด้วยตัวแปรที่เกี่ยวกับมิติร่องน้ำ แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบทั้ง 2 มีลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบร่วมกัน จึงน่าจะรวมเป็นองค์ประกอบมิติร่องน้ำ (Stream dimension factor)

4. องค์ประกอบความกว้างลุ่มน้ำ (Valley width factor) ตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอย่างมีนัยสำคัญสูงสุดคือ มิติเพียงองค์ประกอบเดียวคือ ความกว้างลุ่มน้ำเท่ากับ .92419 จึงเป็นตัวแปรที่เหมือนกับองค์ประกอบมากที่สุด และเป็นลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบที่ 4 ด้วย เมื่อพิจารณาธรรมชาติของตัวแปรนี้ ซึ่งเป็นธรรมชาติขององค์ประกอบนั่นเอง จึงเรียกองค์ประกอบนี้ว่า องค์ประกอบความกว้างลุ่มน้ำ เป็นองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับลักษณะสัณฐานของแอ่งลุ่มน้ำ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการก่อตัวของคูกน้ำเป็นทะเลสาบรูปแอก เพราะความกว้างลุ่มน้ำมีผลต่อพัฒนาการร่องน้ำและรูปทรงสัณฐานร่องน้ำ กล่าวคือ ลำน้ำจะพัฒนาขยายมิติต่าง ๆ ของคูกน้ำได้อย่างรวดเร็ว ในบริเวณที่ลุ่มน้ำกว้างใหญ่ โดยเฉพาะบริเวณที่มีความกว้างของที่ราบน้ำท่วมกว้างกว่าความกว้างขอบเขตคูกน้ำ ลำน้ำสามารถที่จะไหลส่ายวกเวียนเคลื่อนย้ายไปได้ตลอดทั่วทั้งลุ่มน้ำ ในที่สุดก็จะเกิดปรากฏการณ์สุดท้ายของวัฏจักรแห่งการพัฒนารูปทรงสัณฐานลำน้ำ

5. องค์ประกอบระยะห่างจากแกนกลางลุ่มน้ำ (Axis of Valley distance factor) ตัวแปรที่มีน้ำหนักองค์ประกอบหรือสัมประสิทธิ์ระหว่างตัวแปรกับองค์ประกอบอย่างมีนัยสำคัญสูง มีเพียงมิติเดียวคือ ระยะห่างทะเลสาบรูปแอกเท่ากับ -.78137 จึงเป็นตัวแปรที่เหมือนกับองค์ประกอบมากที่สุดและเป็นลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบที่ 5 ด้วย เมื่อพิจารณาธรรมชาติของตัวแปรนี้ที่หมายถึงระยะทางตั้งฉากจากแกนกลางลุ่มน้ำ (Axis of Valley) ไปยอดโค้งทะเลสาบแต่ละแห่ง พบว่า เป็นการวัดการแจกกระจายของทะเลสาบกับแกนกลางลุ่มน้ำ ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างภายนอกของทะเลสาบ จึงเรียกว่า องค์ประกอบระยะห่าง

จากแกนกลางลุ่มน้ำ คุณสมบัติขององค์ประกอบนี้ ทำให้ทราบขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ และลักษณะการเคลื่อนย้ายของลำน้ำ ดังจะเห็นได้จากการแจกกระจายของทะเลสาบทั่วทั้งบริเวณที่ศึกษา ห่างจากแกนกลางลุ่มน้ำออกไปความหนาแน่นของทะเลสาบรูปแอกจะลดลง ดังนั้น ลักษณะทางธรณีสัณฐานเกี่ยวกับระยะห่างจากแกนกลางลุ่มน้ำ จึงเป็นองค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่ส่งผลต่อการเกิดทะเลสาบรูปแอก

จากการวิเคราะห์และเหตุผลที่กล่าวมานั้น จะเห็นว่าองค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่สัมพันธ์กับการเกิดทะเลสาบรูปแอก มี 5 องค์ประกอบ แต่เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดจะพบว่า มิติทางธรณีสัณฐานบางตัววัดรวมหรือเป็นองค์ประกอบร่วมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วย จากการพิจารณาลักษณะโครงสร้างของแต่ละองค์ประกอบพบว่า โครงสร้างขององค์ประกอบดังกล่าวมีลักษณะธรรมชาติทางธรณีสัณฐานร่วมกัน ดังนั้นเพื่อให้ได้โครงสร้างที่ดีหรือเพื่อหาโครงสร้างที่ถูกต้องและเป็นองค์ประกอบจริงน่าจะมีเพียง 2 องค์ประกอบคือ องค์ประกอบมิติทางธรณีสัณฐานลุ่มน้ำ (basin morphometric) และองค์ประกอบมิติลำน้ำ (stream morphometric)

4. สมการพยากรณ์ลักษณะทางธรณีสัณฐานที่เกิดทะเลสาบรูปแอก

เนื่องจากไม่ได้กำหนดโครงสร้างภายในของทะเลสาบเป็นตัวเกณฑ์ (Criteria) ของการพยากรณ์ เพราะลักษณะโครงสร้างมีหลายมิติ ดังนั้นจึงเลือกเอามิติทางธรณีสัณฐานมิติหนึ่ง จาก 12 มิติ คือ ความลาดชันระหว่างทะเลสาบมาเป็นตัวเกณฑ์ของการพยากรณ์ลักษณะทางธรณีสัณฐาน และสร้างสมการในรูปของสมการถดถอยพหุคูณด้วยคะแนนคิปกัสสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{0s} = & 3.51862 O_1 - .21662 V_v + .20082 M_b \\ & + .11494 V_s + .11039 M_L + .02688 O_d + .07418 S_t - .05545 O_i \\ & - .01835 S_o + .02079 R_c - .4658 A_g + 527.74976 \end{aligned}$$

- ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานการพยากรณ์ 557.035 จากสมการใช้พยากรณ์หาลักษณะทางธรณีสัณฐานของมิติใดมิติหนึ่งได้ แต่เมื่อพิจารณาจากความ

คลาดเคลื่อนมาตรฐานสูงมากถึง 557.035 และสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรแรกต่างจากมิติอื่น ๆ มาก จึงทำให้สมการนี้มีอำนาจการพยากรณ์ต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความผิดพลาดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ข้อบกพร่องในการศึกษา

1. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา เป็นข้อมูลที่วัดจากแผนที่และหน่วยงานต่าง ๆ ไม่ได้สำรวจภาคสนามจริง จึงอาจได้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงไปได้
2. ตัวแปรที่เลือกศึกษา ส่วนมากเป็นตัวแปรทางลักษณะธรณีสัณฐานลุ่มน้ำ (Basin morphometric) และมิติของน้ำ (stream dimension) ในรูปเรขาคณิต ซึ่งทั้ง 2 ทิศทางนี้เป็นตัวแปร พื้นผิว (surficial variables) เท่านั้น จึงไม่ครอบคลุมตามมิติทางธรณีสัณฐาน เพราะขาดตัวแปรทาง hydraulic factors และตัวแปรทางอากาศวิทยา (Climatologic factor) ถ้าได้ตัวแปรครบทุกทิศทาง (direction) อาจทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปลี่ยนแปลงได้
3. วิธีดำเนินการเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ได้วิเคราะห์องค์ประกอบแบบ Principal Factor Solution และหมุนแกนแบบ Orthogonal Rotation ตามวิธี Varimax Method ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ I.B.M. 370 ที่สำนักงานสถิติแห่งชาติ
4. เนื่องจากการศึกษานี้ นำเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบการวิเคราะห์ตัวประกอบหลักมาใช้ครั้งแรกสุด จึงวิเคราะห์ผลและแปลความหมายผลการวิเคราะห์ไม่แจ่มชัดเพียงพอ

ข้อเสนอแนะในการศึกษา

1. การเกิดทะเลสาบรูปแอก ยังต้องการ การวิจัยเพื่อตรวจสอบอีก เพราะผลจากการวิจัยครั้งนี้ยังไม่เป็นข้อยุติที่สิ้นสุดลงเพียงนี้ ฉะนั้นจึงควรมีการวิจัย

เทคนิคนี้ในลุ่มน้ำต่าง ๆ เพื่อเป็นเหตุผลประกอบการตั้งทฤษฎีต่อไป

2. การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับองค์ประกอบทางธรณีสัณฐานที่สัมพันธ์กับการเกิดทะเลสาบรูปแอกต่อไป เพื่อให้ได้ความจริงและความถูกต้องมากที่สุด ควรรวบรวมข้อมูลจากการออกสำรวจภาคสนามจริง

3. ในการศึกษาวิจัยต่อไป นอกจากตัวแปรทางลักษณะพื้นผิว ควรจะมีตัวแปรเกี่ยวกับลักษณะน้ำ (hydraulic) ในลำน้ำและตัวแปรทางอากาศวิทยา (climatologic) ด้วย

4. เพื่อต้องการทราบว่าเกิดทะเลสาบรูปแอกแต่ละแห่งมีผลมาจากองค์ประกอบทางธรณีสัณฐานแต่ละองค์ประกอบ มากน้อยต่างกันอย่างไร การวิจัยต่อไป ควรที่จะคำนวณหาคะแนนองค์ประกอบ (factor score) ของทะเลสาบแต่ละแห่งด้วย

5. ควรศึกษาเปรียบเทียบการกำเนิดและมีติโครงสร้างของทะเลสาบรูปแอกในลุ่มน้ำ ที่มีโครงสร้างทางธรณีวิทยาและธรณีสัณฐานต่างกัน

* 6. ควรศึกษาความสัมพันธ์ของทะเลสาบรูปแอกทางด้านพัฒนาเศรษฐกิจที่เป็นประโยชน์ต่อมนุษย์

บรรณานุกรม

กรมแผนที่ทหาร แผนที่ L 7018 (มาตราส่วน 1 : 50,000) ะวาง 5640 I
5640 IV, 5641 I, 5641 II, 5641 III, 5641 IV, 5642 III
5740 IV, 5741 III, 5741 IV รวม 10 ะวาง

กรมแผนที่ทหาร แผนที่ Series 1501 S (มาตราส่วน 1 : 250,000)
ะวาง ND 47 - 4, ND 48 - 1, ND 48 - 2, NE 47 - 12,
NE 47 - 16, NE 48 - 9, NE 48 - 10, NE 48 - 13
และ NE 48 - 14 รวม 9 ะวาง

กรมแผนที่ทหาร แผนที่เล่มแสดงทรัพยากรของประเทศไทย กองแผนที่ภูมิศาสตร์
จัดพิมพ์, 2515, 69 หน้า.

กรมพัฒนาที่ดิน แผนที่ดิน, ชุดแผนที่ดินจังหวัด (มาตราส่วน 1 : 100,000)
ฉบับที่ 9, 13, 2515.

กรมพัฒนาที่ดิน รายงานการสำรวจดิน จังหวัดกาฬสินธุ์ ฉบับที่ 136, 2518,
70 หน้า.

กรมพัฒนาที่ดิน รายงานการสำรวจดิน จังหวัดมหาสารคาม ฉบับที่ 140,
2518, 58 หน้า.

กรมอุตุนิยมวิทยา สถิติอากาศประจำปีของประเทศไทยในคาบ 2494 - 2519,
โรเนียว.

คำรงค์ จรัสวัฒน์ "สถานะเรื่องน้ำของแม่น้ำมูล - ชี และลำน้ำสาขา" วารสาร
พัฒนาที่ดิน ปีที่ 10, ฉบับที่ 93, ประจำเดือนมิถุนายน 2516,
หน้า 3 - 15.

นงคราญ กาญจนประเสริฐ ศึกษาตัวแปรที่มีต่อโครงสร้างคูกน้ำตามแม่น้ำเจ้าพระยา
จากนครสวรรค์ถึงสมุทรปราการ วิทยานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต
 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2519, 70 หน้า.

บพิตร โกมลตรี ปริมาณวิเคราะห์ลักษณะการระบายน้ำและผลที่มีต่อลักษณะ
ภูมิประเทศของลำเซในลุ่มน้ำมูล วิทยานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต,
 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2517, 64 หน้า.

Allison, Ira S., Geology The Science of a Changing Earth, McGraw-Hill Book Company, New York, 1974, P. 309 - 348.

Carlston, Charles W., "The Relation of Free Meander Geometry to Stream Discharge and Its Geomorphic Implications", American Journal of Science, 263 : 1965, P. 864 - 885.

✓ Davis, William M., geographical essays, Dover Publications, Inc., New York, 1954, 777 PP.

Flint, Ridchard F., "Meander" Physical Geology, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1974 p. 134 - 146.

Gilluly, James W.H., Principles of Geology, Fresman and Company, San Francisco, 1968, P. 207 - 234.

Haggett, Peter., Net Work Analysis in Geography, Butter & Tanner Ltd, London, 1969, 348 PP.

(Handy, Ridchard L.), "Alluvial Cutoff Dating from Subsequent Growth of a Meander" Geological Society of America Bulletin 83 : 1972, P.475 - 480.

Harman, Harry H., Mordern Factor Analysis, The University of Chicago Press, Ltd, Chicago, 1968, 474 PP.

Hickin, Edward J., "The Development of Meander in Natural River-Channels", American Journal of Science, 274 : 1974, P.414 - 442.

- ✓ Keller, E.A., "Development of Alluvial Stream Channels & Five Stage Model", Geological Society of American Bulletin, 83 : 1972, P.1531 - 1536.

Lamoreaux, P.E. & Others, Reconnaissance of the Geology and Ground Water of the Khorat Plateau, Thailand, Prachandra Printing Press, Bangkok, 1959, 62 PP.

- ✓ Langbein, Watter B., "River Meanders - Theory of Minimum Variance U.S. Survey Paper Professor, 1966, H 15.

- ✓ Leet, Don L., "Running Water" Physical Geology, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1965 P.135 - 155.

- ✓ Longwell, Chester R., "Running Water", Introduction to Physical Geology, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1956, P. 115 - 132.

- ✓ Longwell Chaster R., "Stream" Physical Geology, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1956, P.72 - 97.

Leopald, Luna B., "River Meanders" American Journal of Science, 71 : 1960, P.769 - 794.

Melton, Mark A., "Correlation Structure of Morphometric Properties. of Drainage Systems and Their Controlling Agents" The Journal of Geology, 66 : 1958, P.442 - 460.

Sawkin, Frederick J., "The Evolving Earth", Macmillan Publishing Co, Inc., New York, 1974. 470 PP.

- ✓ Small, R.J., "Stream Erosion" The Study of Landforms. Cambridge University Press, 1972 P.225 - 242.

Strahler, Arthers N., Hypsometric 'Area - Altitude) Analysis of Erosion Topography" Bulletin of the Geological Society of America, 63 : 1952, P.1117 - 1149.

- ✓ Strahler, Arthur N., "Dimensional Analysis Applied to Fluvially Eroded Landforms", Bulletin of The Geological, 69 : 1958, P.279 - 300.

- ✓ Strahler, Arthur N., Physical Geography, John Wiley and Sons, Inc.;
New York, 1965, 733 pp.
- Tinkler, Keith, "Pools, Riffles and Meanders", Bulletion of Geological, 81 : 1970, P.547 - 552.
- Ton, David K., "Meandering Habit of Supraglacial Streams" Geological Society of America Bulletin, 83 : 1972, P.201 - 214.
- ✓ Thornbury, William D., "Stream Meandering" Principle of Geomorphology, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969, P.128 - 150.
- Yoxall, W.H., "The Relationship between Falling Base Level and Lateral Erosion in Experimental Streams, Bulletin of Geological, 80 : 1969, P.1379 - 1384.

ภาคผนวก

ตาราง 1 แสดงวิธีการหาคุณสมบัติพื้นฐานที่สัมพันธ์กับทะเลสาบรูปแอก

ลำดับที่	ทะเลสาบรูปแอก	มิติทางธรณีสัณฐาน											
		ระดับช่องทะเลสาบ- รูปแอก (O1)	ความกว้างผืนน้ำ (Vw)	ความลึกโดยเฉลี่ย (St)	มุมของร่องน้ำโค้ง(Ag)	รัศมีความโค้ง (Rc)	ระยะทางของทะเลสาบ รูปแอก (Od)	คุณสมบัติของดิน(So)	ช่วงระยะทะเลสาบ รูปแอก (O1)	ขอบเขตทุ่งน้ำ(Mb)	ความยาวของแนว (ML)	ความลาดชันแนวขวาง (Vs)	ความลาดชันระนาบ ทะเลสาบ(Os)
1	ภูน้ำใส	42.50	50.700	1.711	65	210.00	100	32.38	1.500	640	10.2	.0364	.1729
2	ภูถ้ำ	38.00	49.925	2.492	78	221.50	300	37.00	3.331	800	655	.2000	.1725
3	หนองสองชั้น	36.00	50.350	2.313	102	494.00	2275	37.94	2.000	1115	1035	.1000	.1524
4	บึงบัว	28.00	53.250	2.533	100	215.00	1675	27.63	26.330	1615	1750	.0211	.1095
5	ภูหัวช้าง	58.50	57.395	1.234	51	207.00	3500	29.88	2.911	430	715	.3333	.2222
6	ภูทเวียน	49.00	54.850	1.430	725	232.50	3600	41.88	0.230	565	1300	.1000	.0032
7	ภูทกวาง	55.50	54.900	1.511	433	235.00	2600	21.19	3.561	550	1410	.1091	.1067
8	ภูตขี้	32.50	33.750	1.670	65	180.00	1750	34.50	3.947	550	890	.0050	.0844
9	ภูตขี้	30.50	40.950	2.626	57	420.00	795	27.63	3.777	1705	2375	.1143	.0569
10	ภูตแดง	26.50	41.000	2.530	425	155.00	2405	27.63	3.223	1325	2075	.0400	.1781
11	ภูตประทาย	27.50	40.650	2.532	66	346.00	3210	31.22	1.600	1325	2075	.0833	.1946
12	หนองแวง	28.00	40.550	2.501	46	186.00	2265	37.94	2.000	1325	2075	.0667	.1895

ตาราง 1 (ต่อ)

ที่ บัญชี	รายละเอียด	มิติทางทรัพย์สินฐาน											
		O1	Vw	St	Ag	Rc	Od	So	Ol	Mb	FL	Vs	Os
15	กฐกรฐเศ	29.50	39.750	2.340	60	237.00	3585	27.63	0.665	1025	1.555	.1000	.2159
14	กฐทวาย	30.50	39.750	2.941	80	400.50	1275	48.25	2.368	1630	1.35	.0667	.2011
15	กฐโคง	28.50	39.450	1.510	48	166.00	100	48.25	2.313	1955	1.175	.1212	.0766
16	กฐน้ำใส	27.00	38.950	2.430	60	340.50	2820	24.8	0.606	1595	3.175	.0888	.1926
17.	กฐแดง	28.00	39.250	1.923	46	144.50	1600	37.94	2.153	1515	2.010	.0625	.1836
18	กฐหนองหวาย	27.00	39.200	1.541	90	196.00	100	27.63	0.314	1520	4010	.0057	.0593
9	กฐเก็ดยไถ	30.00	39.450	2.200	125	282.00	50	26.21	3.225	1535	.875	.1111	.1888
20	กฐควน	34.50	39.150	2.020	102	307.00	690	16.03	1.707	1637	1100	.4000	.1799
21	กฐโคง	29.00	38.850	2.830	85	271.50	4100	27.63	0.163	1225	1325	.0800	.1603
22	กฐอดิทย	21.00	34.600	2.010	833	173.50	2075	26.21	0.097	687	1.115	.0333	.1257
23	กฐอลนอย	24.00	35.050	2.820	85	541.00	306	21.83	2.665	1875	931	.1482	.1547
24	กฐอด	24.50	34.950	2.000	73.3	270.00	12	48.25	0.740	573	1085	.0585	.1333
25	หนองหวายมา	21.00	34.600	1.555	70	450.00	905	27.63	1.702	707	1610	.0200	.1487
26	กฐเวียง	21.00	34.850	1.555	70	150.00	1675	30.56	0.869	760	1250	.03636	.1667

ตาราง 1 (ต่อ)

ตัว เลข	รายละเอียด	มิติทางธรณีวิทยา											
		Ol	Ww	St	Ag	Re	Od	So	O ₃	Lb	ML	Vs	Os
27	บุคซุย	19.5	34.900	1.788	70	249.00	4245	16.03	3.200	692	1315	.1040	.0500
28	บุคซอนอก	17.5	34.950	2.000	76.4	200.00	385	24.80	2.401	687	780	.0381	.0091
29	บุคหัวถนน	16.5	34.950	2.000	80	193.00	1390	27.63	1.281	1280	1115	.1613	.0667
30	บุคอใหญ่	18.0	34.800	1.776	73.3	375.00	130	48.25	3.813	2125	1885	.0921	.0050
31	บุคเลิงบ่อ	20.5	35.150	2.500	88	323.00	3870	21.83	0.225	1008	1158	.1296	.0889
32	บุคทุ่งกลา	19.5	35.300	2.073	90	250.00	1515	16.03	0.743	1000	1190	.1172	.0160
33	หนองเขาวัว	24.	37.600	3.300	75	363.00	1080	20.41	6.472	1365	1324	.1413	.0800
34	บุคชวย	28.	40.200	2.000	72.5	283.00	60	27.35	11.500	1160	873	.1264	.1000
35	บุคโนนแดง	24.	40.300	2.545	88.3	235.00	740	21.20	10.000	775	858	.0714	.0400
36	บุคเปล่ง	23.	40.200	2.000	60	206.00	3375	13.77	1.091	510	791	.0402	.0285
37	บุคเขื่อน	25.5	41.900	1.500	58.6	148.50	1880	31.01	1.767	350	1425	.0504	.0143
38	บึงโค่น	17.	45.450	1.710	58.3	237.00	810	24.4	0.999	540	1032	.0100	.0889
39	บุคเขียงสา	16.5	43.400	1.400	48.6	199.00	5970	21.64	0.500	493	1240	.1148	.0600
40	บุคเวียง	16.	46.650	1.857	68.7	202.5	2754	29.14	0.400	775	975	.0955	.1500

ลำดับ เลข	พระตำบารวมออก	มิติทางธรณีวิทยา											
		Ol	Vw	St	Ag	Rc	Od	So	Oi	Mb	ML	Vs	Os
41	หนองหวาย	13.50	46.500	1.576	50	271.50	4820	27.82	0.500	315	970	.0861	.0250
42	ภูมิ่งไค่น	12.50	45.150	1.583	65	210.50	1725	25.41	0.166	640	1100	.0083	.0800
43	ภูตหลอม	15.00	45.600	1.364	56.4	257.00	1270	22.83	.562	550	955	.0208	.0286
44	ภูจุก	14.00	42.900	1.477	58.7	251.00	3270	30.83	3.776	525	740	.0793	.0286
45	ภูคว้งขอ	15.50	42.750	2.033	87.5	333.00	615	49.38	5.000	1090	1020	.0296	.0200
46	ภูคกวางน้อย	6.50	45.550	2.400	61.4	100.00	1000	36.49	0.571	1890	1670	.0441	.0160
47	ภูโค้ง	9.50	44.350	3.166	75	416.50	1670	27.82	8.000	1295	1340	.0408	.0400
48	ภูคกวางใหญ่	13.50	48.400	2.013	73.2	333.00	935	29.19	1.447	1095	1825	.1156	.0133
49	ภูคขวาง	12.50	48.900	1.800	71.6	250.00	2175	28.72	2.000	1000	1275	.0309	.0044
50	ภูทิว	13.50	45.250	2.025	81.6	312.50	1865	32.80	12.000	1255	1565	.1111	.0364
51	ภูผาลง	4.00	43.250	1.200	50	255.50	2060	32.60	1.500	1030	1325	.0127	.0286
52	ภูผาหิน	7.50	42.950	1.592	68.3	406.00	5715	25.56	0.750	665	1170	.0427	.0444
53	ภูทิว	7.50	42.900	2.000	73.7	250.00	6095	31.42	1.555	1715	1180	.0426	.0333
54	หนองปลาปาก	7.50	43.100	1.875	72	175.00	75	10.32	6.250	560	1165	.0800	.0145

ตาราง 1 (ต่อ)

พื้นที่ ไร่	ชื่อแปลงดิน	มิติทางธรณีสัณฐาน											
		Ol	Vw	St	Ag	Pc	Od	So	Ol	Mb	ML	Vs	Os
55	แปลง 1	8.00	42.850	1.700	77.6	400.00	4470	31.42	0.750	1240	1315	.0295	.0200
56	แปลง 2	11.50	42.650	1.918	92	318.50	265	36.40	7.700	770	1500	.4705	.1143
57	แปลง 3	9.50	42.600	2.104	72.5	323.00	5285	31.42	0.800	790	1270	.0417	.0500
58	แปลง 4	12.00	43.750	1.812	77.5	250.00	1555	38.36	8.000	755	160	.0438	.0444
59	แปลง 5	8.50	39.050	1.700	75	243.50	5525	22.83	0.666	870	910	.0379	.0286
60	แปลง 6	9.00	43.200	2.142	71.6	321.00	2090	22.83	0.500	785	1125	.0399	.0240
61	แปลง 7	7.50	43.250	2.561	76.2	150.00	2145	22.83	0.033	1105	980	.0398	.0462

หน่วยเป็น : Ol, Pc, Od, Mb, ML หน่วยเป็น เมตร

Vs, Os หน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์

Ag หน่วยเป็น องศา

Vw หน่วยเป็น กิโลเมตร

ตาราง 2 แสดงสัมประสิทธิ์คะแนนองค์ประกอบ (Factor Score coefficients)

ตัวแปร	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
Ol	-0.10578	0.39486	-0.00390	-0.01935	0.10455
Vw	0.01741	0.03727	0.08867	0.99252	-0.08915
St	0.16619	-0.02697	-0.07261	0.01648	-0.05535
Ag	0.54596	0.06509	-0.47333	0.11960	0.17736
Fe	0.11569	0.01997	0.00684	-0.01587	-0.08492
Od	0.16015	-0.01918	-0.11847	-0.06782	-0.71745
Sd	-0.05650	-0.02068	-0.00263	-0.00582	0.04141
Om	0.02700	-0.04570	0.02719	0.03299	0.10078
Mb	0.44012	-0.11113	0.76460	0.17746	-0.05145
ML	-0.08465	-0.01209	0.11925	-0.02491	0.00668
Vs	-0.00425	0.10062	-0.11792	-0.05055	0.00574
Os	0.08828	0.57229	0.10754	-0.11139	-0.17121

ตาราง 3 แสดงผลการคำนวณ Stepwise Multiple
Regression ขั้น 11 จากคอมพิวเตอร์

STEP 11

VARIABLE ENTERED..... 4

SUM OF SQUARES REDUCED IN THIS STEP 2276.065

PROPORTION REDUCED IN THIS STEP 0.000

CUMULATIVE SUM OF SQUARES REDUCED..... 12160460.000

CUMULATIVE PROPORTION REDUCED..... 0.444 of
27364576.000

FOR 11 VARIABLES ENTERED

MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT... 0.667

(ADJUSTED FOR D.F.)..... 0.577

F-VALUE FOR ANALYSIS OF VARIANCE... 3.563

STANDARD ERROR OF ESTIMATE 557.035

(ADJUSTED FOR D.F.)..... 610.201

VARIABLE NUMBER	REGRESSION COEFFICIENT	STD. ERROR OF REG. COEFF.	COMPUTED T. VALUE
01	3.51862	0.72743	4.837
Vw	-0.21662	0.15693	-1.380
Mb	0.20082	0.20962	0.958
Vs	0.11494	0.09468	1.214
MI	0.11039	0.13229	0.834

ตาราง 3 (ต่อ)

VARIABLE NUMBER	BEGRESSION COEFFICIENT	STD.ERROR OF REG.COEFF.	COMPUTED T-VALUE
Od	0.02688	0.04885	0.550
St	0.07418	0.15554	0.477
Ol	-0.05545	0.20110	-0.276
So	-0.01835	0.07810	-0.235
Rc	0.02079	0.08668	0.240
Ag	-0.46580	5.43868	-0.086

INTERCEPT , 527.74976

การคำนวณพื้นที่ใต้ Hypometric curve

เนื่องจาก curve ของกราฟ 3 ไม่เป็น hyperbolic จึงต้องแยก integrate เป็นช่วง ๆ โดยมีสูตรทั่วไปดังนี้

$$S = \frac{Y_n - 1}{X_n - 1} \int_{X_n - 1}^{X_n} X dX$$

ผลการคำนวณแต่ละช่วงปรากฏดังนี้

	ช่วงระยะที่ integrate		ค่า integrate
1	$Y_1 - Y_2$	$X_2 - X_1$	0.003805
2	$Y_2 - Y_3$	$X_3 - X_2$	0.008400
3	$Y_3 - Y_5$	$X_5 - X_3$	0.004000
4	$Y_5 - Y_6$	$X_6 - X_5$	0.001737
5	$Y_6 - Y_7$	$X_7 - X_6$	0.003054
6	$Y_7 - Y_8$	$X_8 - X_7$	0.003364
7	$Y_8 - Y_9$	$X_9 - X_8$	0.015330
8	$Y_9 - Y_{10}$	$X_{10} - X_9$	0.034760
9	$Y_{10} - Y_{11}$	$X_{11} - X_{10}$	0.051044
Sn			0.125494

แสดงว่า พื้นที่ผิวพื้นเหลือจากการถักกรองนพักพาไปเท่ากับ 0.125494 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 12.5494% ฉะนั้นมวลดินที่ถูกถักกรองนพักพาไป 87.4506%

ประวัติย่อผู้วิจัย

๑

๘๖๔ ๘/๑
๘๖๑
๘/๑

ชื่อ ประสิทธิ์ คุณรัตน์

บุตรของนายบุญ คุณรัตน์, นายคุณ เสนหา และนางเกื้อน เสนหา (อบรม)
เกิด 7 กรกฎาคม 2491 บ้านเลขที่ 25/1 ถนนวารีราชเคช อ.เมือง
จ.ยโสธร

การศึกษา ประถมศึกษา โรงเรียนสุขวิทยากร พ.ศ. 2596 - 2502
มัธยมศึกษา (ม.3) โรงเรียนอรุณรัตน์วิทยาคม พ.ศ. 2502 - 2505
(ม.ศ.3) โรงเรียนยโสธรพิทยาคม พ.ศ. 2505 - 2508
ประกาศนียบัตรวิชาการศึกษา (ป.กศ.) วิทยาลัยครูอุบลราชธานี พ.ศ.
พ.ศ. 2508 - 2510
ประกาศนียบัตรพิเศษมัธยม (พ.ม.) สนามสอบอุบลราชธานี พ.ศ. 2513
ปริญญาการศึกษาบัณฑิต (กศ.บ.) เกียรตินิยมอันดับ 2 วิทยาลัย -
วิชาการศึกษา ประสานมิตร พ.ศ. 2515 - 2517
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต (กศ.ม.) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประสานมิตร พ.ศ. 2518 - 2520
การทำงาน ครู โรงเรียนอุบลวิทยาคม อ.เมือง, จ.อุบลราชธานี พ.ศ. 2511 -
2515
ครู โรงเรียนหลักเมืองมหาสารคาม อ.เมือง, จ.มหาสารคาม
พ.ศ. 2515 - 2518